

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HARMONİK RADAR İLE ELEKTRONİK DEVRELERİN TESPİTİ VE
SINIFLANDIRILMASI**

DOKTORA TEZİ
Handan İLBEĞİ

Elektronik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Harun Taha HAYVACI

ARALIK 2022





TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Handan İLBEĞİ



ÖZET

Doktora Tezi

HARMONİK RADAR İLE ELEKTRONİK DEVRELERİN TESPİTİ VE SINIFLANDIRILMASI

Handan İLBEĞİ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Harun Taha HAYVACI

Tarih: Aralık 2022

Günümüzde elektronik cihazların büyük çoğunluğu, diyot, transistör, yarıiletkenler vb. doğrusal olmayan devre elemanları içerir. Doğrusal olmayan bu devreler, iletilen temel frekansın harmoniklerinde geri-ışımaya neden olurlar. Bu sayede bu devrelerin Radyo Frekansı (RF) yayını ile tespiti ve sınıflandırılmasında harmonik radar kullanılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmaların çok büyük bir çoğunluğu, elektronik cihazların tespiti, menzil tayini ve takibine dayanırken, sınırlı sayıda çalışma, cihazların harmonik radar ile ayrıştırılması ve sınıflandırılmasına odaklanmıştır. Bu tezde, doğrusal olmayan yapıdaki elektronik devrelerden geri-ışık sinyaller analiz edilerek, bu devrelerin tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik özgün metotlar geliştirilmiştir.

Bu tez kapsamında, ilk olarak, Frekans Süpürmeli Harmonik Radar (FSHR) yaklaşımı ile elektronik devreleri sınıflandıran özgün bir yöntem sunulmaktadır. Literatürde bulunan çalışmalardan farklı olarak elektronik devrelere sabit güce sahip frekans süpürmeli bir sinyal gönderilmektedir. FSHR yaklaşımı sayesinde farklı tipteki elektronik devreler, farklı harmonik yanıtlar sergilerken, aynı türdeki devreler, benzer harmonik davranışlar göstermektedir. Elektronik devrelerin sınıflandırılmasında harmonik tepkilerden elde edilen istatistiksel ve Fourier öznitelikler kullanılmaktadır.

Sınıflandırma performansı hem harmonik hem de öznitelik uzaylarında ifade edilmektedir. Harmonik uzay, ilk üç harmonikten oluşan üç boyutlu uzay olarak tanımlanmaktadır. Üç boyutlu öznitelik uzay ise istatikselsel ve Fourier parametrelerinden oluşmaktadır. Ek olarak, gürültü varlığındaki harmonik tepkiler kullanılarak Monte Carlo benzetimleri ile FSHR yaklaşımının sınıflandırma performansı değerlendirilmektedir.

İlk çalışmanın devamı olarak ikinci çalışmada, elektronik devrelerin sınıflandırılmasında yeni öznitelik kümeleri kullanılmaktadır. Elektronik devrelere, sabit güçte frekans süpürmeli sinyaller iletilerek devrelerin doğrusal olmayan cevapları kaydedilmektedir. Önceki çalışmadan farklı olarak, istatikselsel ve Fourier öznitelik kümeleri hem harmonik hem de öznitelik parametrelerinden oluşmaktadır. Bu öznitelik kümeleri ile öznitelik parametrelerini ve harmonik bilgisini tek tek analiz etmekten ziyade bütün parametrelerin bir bütün halinde kullanılması, performans karşılaştırması için iyi bir temel sağlamaktadır.

Tez çalışmaları kapsamında yapılan bir başka çalışmada ise elektronik devrelerin harmonik radar ile sınıflandırılmasına dair yeni bir yaklaşım geliştirilmektedir. Önceki çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada sunulan doğrusal model yaklaşımı sayesinde, elektronik devrelerin harmonik yanıtları, parametre vektörleri ile ilişkilendirilir. Elektronik devrelere güç süpürmeli zamanla değişen tek-tonlu ve iki-tonlu sinyaller gönderilir ve her bir devre için ayırt edici olan parametre vektörleri elde edilir. Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü (CWGN) varlığında En Büyük Olabilirlik Kestiricisi (MLE) kullanılarak tahmini parametre vektörleri elde edilmekte ve normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin istatikselsel öznitelikleri kullanılarak çeşitli elektronik devreler sınıflandırılmaktadır. Benzetim sonuçları, sunulan doğrusal model yöntemi ile parametre vektörlerinin elektronik devreleri başarılı bir şekilde sınıflandırdığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Harmonik radar, Doğrusal olmayan radar, Elektromanyetik girişime, Doğrusal olmayan hedef, Sınıflandırma.

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

DETECTION AND CLASSIFICATION OF ELECTRONIC CIRCUITS WITH HARMONIC RADAR

Handan İLBEĞİ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Harun Taha HAYVACI

Date: December 2022

Nowadays, the vast majority of electronic devices contain non-linear circuit elements such as diodes, transistors, semiconductors, etc. These nonlinear circuits cause re-radiation at the harmonics of the transmitted frequency. Thus, harmonic radar is used in the detection and classification of these circuits by Radio Frequency (RF) broadcasting. While the majority of the studies in the literature are based on detection, ranging, and tracking of electronic devices, a limited number of studies have focused on distinguishing and classification of electronic devices with harmonic radar. In this thesis, re-radiated signals from nonlinear electronic circuits were analyzed and unique methods were developed for the detection and classification of these circuits.

In this thesis, firstly, a novel method for classifying electronic circuits with a Frequency-Sweep Harmonic Radar (FSHR) approach is presented. Unlike studies in the literature, a frequency-swept signal with a constant power is transmitted to the electronic circuits. Different types of electronic circuits exhibit different harmonic responses, while the same type of circuits show similar harmonic behavior via FSHR approach. Statistical and Fourier features obtained from harmonic responses are utilized to classify electronic circuits. Classification performance is expressed in both harmonic and feature spaces. The harmonic space is defined

as a three-dimensional space consisting of the first three harmonics. On the other hand, a three-dimensional feature space consists of statistical and Fourier parameters. Furthermore, the classification performance of the FSHR approach is evaluated with Monte Carlo simulations using harmonic responses in the presence of noise. In the second study, as a continuation of the first study, new feature sets are used to classify electronic circuits. The nonlinear responses of the circuits are recorded by transmitting constant power frequency-swept signals to the electronic circuits. Unlike the previous work, statistical and Fourier feature sets created from both harmonic and feature parameters. Rather than analyzing the feature parameters and harmonic information individually, using all parameters as a feature set provides a good basis for performance comparison.

In another study conducted within the scope of the thesis studies, a new approach is developed for the classification of electronic circuits with harmonic radar. Unlike previous studies, harmonic responses of electronic circuits are associated with parameter vectors with the proposed linear model. Power-swept time-varying single-tone and two-tone signals are sent to electronic circuits and distinctive parameter vectors are obtained for each circuit. In the presence of Complex White Gaussian Noise (CWGN), estimated parameter vectors are achieved using the Maximum Likelihood Estimator (MLE) and various electronic circuits are classified using statistical features of the normalized estimated parameter vectors. The simulation results show that the parameter vectors successfully classify the electronic circuits with the presented linear model method.

Keywords: Harmonic radar, Nonlinear radar, Electromagnetic re-radiation, Nonlinear target, Classification.

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana daima yol gösteren, tez çalıŐmalarıma her zaman ışık tutan, desteğini benden hiç bir zaman eksik etmeyen ve kendisini her zaman örnek edindiğim saygıdeğer danıŐman hocam Dr. Öğr. Üyesi Harun Taha HAYVACI'ya sonsuz teşekkür ederim. ÇalıŐmalarımın her aŐamasında büyük desteği ve katkıları olan ve kıymetli yardımlarını benden esirgemeyen Doç. Dr. İmam Őamil YETİK hocama çok teşekkür ederim. Ayrıca, Doktora eğitimim boyunca bana sağladığı araŐtırma bursu için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ve değerli tecrübelerinden faydalandığım öğretim üyelerine teŐekkürlerimi sunarım.

Dünya'daki en büyük zenginliğim, herŐeyimi borçlu olduğum, üzerimde çok büyük emeği olan, büyük fedakarlıklarla beni bugüne getiren canım annem Fatma İLBEGİ'ne ve bugünlere gelmemde çok büyük desteği olan, her zaman kuvvetini yanımda hissettiğim, en büyük dayanağım kıymetli babam İbrahim İLBEGİ'ne tüm kalbimle çok teşekkür ederim. Değerli annem ve babamın üzerimdeki emeklerini asla ödeyemeceğimi biliyorum. Ayrıca, her zaman sevgi ve desteğiyle yanımda olan, neŐe ve moral kaynağım canım kardeŐim Dr. Ahmed Melik İLBEGİ'ne en içten duygularıyla teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
TEŞEKKÜR	x
İÇİNDEKİLER	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
KISALTMALAR	xviii
SEMBOL LİSTESİ	xx
1. GİRİŞ	1
1.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Devrelerin Tanımlanması	2
1.2 Doğrusal Olmayan Hedeflerden Harmonik Geri-Işıma	3
1.3 Literatür Araştırması	4
1.4 Tezin Amacı	7
1.5 Organizasyon	8
2. FREKANS SÜPÜRMELEİ HARMONİK RADAR YAKLAŞIMI İLE ELEKTRONİK DEVRELERİN SINIFLANDIRILMASI	9
2.1 Frekans Süpürmeli Harmonik Radar	9
2.2 Elektronik Devrelerin Sınıflandırılmasında Kullanılan Öznitelikler	11
2.2.1 İstatiksel öznitelikler	11
2.2.2 Fourier öznitelikler	13
2.3 Deneysel Tasarım ve Benzetimler	14
2.4 Benzetim Sonuçları ve Performans Analizi	16
2.4.1 İstatiksel öznitelik sonuçları	17
2.4.2 Fourier öznitelik sonuçları	23
2.5 Sonuçlar	29
3. ELEKTRONİK DEVRELERİ HARMONİK RADAR İLE SINIFLANDIRAN ÖZNİTELİK KÜMELERİNİN PERFORMANS ANALİZİ	31
3.1 Giriş	31
3.2 Elektronik Devrelerden Harmonik Geri-Işıma	32
3.3 Hedefleri Sınıflandıran Öznitelik Kümeleri	32
3.3.1 İstatiksel öznitelik kümesi	33
3.3.2 Fourier öznitelik kümesi	34
3.4 Deneysel Tasarım, Veri Toplama ve Benzetimler	34
3.5 Performans Değerlendirmesi ve Analizi	35
3.6 Sonuçlar	37
4. DOĞRUSAL BİR MODEL KULLANILARAK ELEKTRONİK DEVRELERİN HARMONİK RADAR İLE SINIFLANDIRILMASI	39
4.1 Giriş	39
4.2 Taylor Serisi Modeli	40

4.2.1 Tek-tonlu iletim	40
4.2.2 İki-tonlu iletim	41
4.3 Doğrusal Model	43
4.3.1 Bilinmeyen parametreler vektörü ve gözlem matrisi	44
4.3.1.1 Tek-tonlu iletim durumunda geri-ışığıyan sinyal	45
4.3.1.2 İki-tonlu iletim durumunda geri-ışığıyan sinyal	45
4.4 En Büyük Olabilirlik Kestiricisi	46
4.5 Tam Kerteli Gözlem Matrisleri	47
4.6 Deneysel Tasarım ve Benzetimler	48
4.7 Performans Değerlendirmesi ve Benzetim Sonuçları	50
4.7.1 Tek-tonlu iletime ait benzetim sonuçları	51
4.7.2 İki-tonlu iletime ait benzetim sonuçları	53
4.8 Sonuçlar	58
5. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR	61
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Frekans süpürmeli harmonik radar yaklaşımı.	10
Şekil 2.2: Çok katlı yükselteç devrelerinin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde alınan güç eğrileri.	11
Şekil 2.3: Ortak emitörlü yükselteç devrelerinin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde alınan güç eğrileri.	12
Şekil 2.4: Testere dişi osilatör devrelerinin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde alınan güç eğrileri.	12
Şekil 2.5: Çok katlı yükselteç devre şeması.	15
Şekil 2.6: Ortak emitörlü yükselteç devre şeması.	15
Şekil 2.7: Testere dişi osilatör devre şeması.	16
Şekil 2.8: SNR = 2 dB için üç boyutlu harmonik uzaydaki istatistiksel özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Varyans, (b) Çarpıklık, (c) Basıklık. . .	18
Şekil 2.9: SNR = 14 dB için üç boyutlu harmonik uzaydaki istatistiksel özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Varyans, (b) Çarpıklık, (c) Basıklık.	19
Şekil 2.10: Farklı SNR değerleri için istatistiksel özniteliklerin sınıflandırma performansı.	20
Şekil 2.11: SNR = 2 dB için harmoniklere ait istatistiksel uzay gösterimi, (a) 2. Harmonik, (b) 3. Harmonik.	20
Şekil 2.12: İstatistiksel öznitelik uzayında temsil edilen harmoniklerin değişen SNR değerlerindeki sınıflandırma performansı.	21
Şekil 2.13: Hayvacı ve diğ. tarafından sunulan çalışmanın sınıflandırma performansı sonuçları, (a) İstatistiksel öznitelikler, (b) Harmonikler.	23
Şekil 2.14: SNR=2 dB için üç boyutlu harmonik uzayda temsil edilen Fourier özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Düşük frekans, (b) Orta frekans, (c) Yüksek frekans.	24
Şekil 2.15: SNR=14 dB için üç boyutlu harmonik uzayda temsil edilen Fourier özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Düşük frekans, (b) Orta frekans, (c) Yüksek frekans.	25
Şekil 2.16: Farklı SNR değerleri için Fourier özniteliklerin sınıflandırma performansı.	26
Şekil 2.17: SNR=2 dB için ikinci ve üçüncü harmoniklerin Fourier öznitelik uzayındaki saçılma diyagramları, (a) 2. Harmonik, (b) 3. Harmonik.	26
Şekil 2.18: SNR=14 dB için ikinci ve üçüncü harmoniklerin Fourier öznitelik uzayındaki saçılma diyagramları, (a) 2. Harmonik, (b) 3. Harmonik.	27
Şekil 2.19: Fourier öznitelik uzayında temsil edilen harmoniklerin farklı SNR değerlerindeki sınıflandırma performansı.	28

Şekil 2.20: Hayvacı ve diğ. tarafından sunulan çalışmanın sınıflandırma performansı sonuçları, (a) Fourier öznitelikler, (b) Harmonikler.	28
Şekil 3.1: İstatiksel ve Fourier öznitelik kümelerine ait farklı SNR seviyelerindeki sınıflandırma performansları.	37
Şekil 4.1: Diyot kenetleyici devre şeması.	48
Şekil 4.2: Diyot sınırlayıcı devre şeması.	49
Şekil 4.3: Tam dalga doğrultucu devre şeması.	49
Şekil 4.4: Tek-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB'de normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) Ortalama, (b) Varyans. 51	
Şekil 4.5: Farklı SNR seviyelerinde, ω_0 iletilen frekansın ilk üç harmoniğinden elde edilen ortalama ve varyans özniteliklerinin sınıflandırma performansları.	52
Şekil 4.6: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB'de, ω_1 frekansının harmoniklerine ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) ω_1 frekansının harmonikleri, ortalama, (b) ω_1 frekansının harmonikleri, varyans.	54
Şekil 4.7: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB'de, ω_2 frekansının harmoniklerine ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) ω_2 frekansının harmonikleri, ortalama, (b) ω_2 frekansının harmonikleri, varyans.	54
Şekil 4.8: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB'de, ilk üç arakiplenim frekanslarına ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) İlk üç arakiplenim frekansları, ortalama, (b) İlk üç arakiplenim frekansları, varyans.	55
Şekil 4.9: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB'de, son üç arakiplenim frekanslarına ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) Son üç arakiplenim frekansları, ortalama, (b) Son üç arakiplenim frekansları, varyans.	55
Şekil 4.10: Değişen SNR seviyelerinde, ω_1 ve ω_2 frekanslarının ilk üç harmoniğinin istatiksel özniteliklerine ait sınıflandırma performansları. 57	
Şekil 4.11: Değişen SNR seviyelerinde, arakiplenim frekanslarının istatiksel özniteliklerine ait sınıflandırma performansları.	58

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: SNR=8 dB’de birinci, ikinci ve üçüncü harmonik uzayda temsil edilen istatistiksel özniteliklere ait karışıklık matrisleri.	19
Çizelge 2.2: SNR=8 dB için üç boyutlu istatikselsel öznitelik uzayında ikinci ve üçüncü harmoniğe ait karışıklık matrisleri.	21
Çizelge 2.3: Gallagher tarafından sunulan çalışmadaki beş elektronik cihaza ait sınıflandırma performansları	22
Çizelge 2.4: SNR=8 dB için birinci, ikinci ve üçüncü harmonik uzayda, Fourier öznitelikler için karışıklık matrisleri.	24
Çizelge 2.5: SNR=8 dB için üç boyutlu Fourier öznitelik uzayında ikinci ve üçüncü harmoniğe ait karışıklık matrisleri.	27
Çizelge 2.6: SNR=8 dB için sınıflandırma performansı karşılaştırma tablosu. . .	29
Çizelge 3.1: SNR=8 dB için istatikselsel ve Fourier öznitelik kümelerine ait karışıklık matrisleri.	36
Çizelge 4.1: Tek-tonlu iletim durumu için SNR = 5 dB’deki karışıklık matrisleri.	52
Çizelge 4.2: SNR = 5dB’de iki-tonlu iletim durumu için ortalama ve varyansa ait karışıklık matrisleri.	56
Çizelge 4.3: SNR = 5dB’de iki-tonlu iletim durumu için ilk üç arakiplenim frekanslarına ait karışıklık matrisleri.	56
Çizelge 4.4: SNR = 5dB’de iki-tonlu iletim durumu için son üç arakiplenim frekanslarına ait karışıklık matrisleri.	56



KISALTMALAR

BJT	: İki Kutuplu Eklem Transistörü
CWGN	: Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü
DFT	: Ayrık Fourier Dönüşümü
EM	: Elektromanyetik
FSHR	: Frekans Süpürmeli Harmonik Radar
I-V	: Akım-Gerilim
iid	: Özdeşçe Dağılmış Bağımsız
kNN	: k-En Yakın Komşu
LS	: En Küçük Kareler
MLE	: En Büyük Olabilirlik Kestirimi
NLJ	: Doğrusal Olmayan Eklem
PDF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
RF	: Radyo Frekansı
RFID	: Radyo Frekans ile Tanımlama
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
SWPVAR	: Süpürülmüş Değişken Kontrolü



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
s_{out}	Hedeften geri-ışığıyan sinyal
s_{in}	Hedefe gelen sinyal
a_p	Kompleks güç serisi katsayısı
σ^2	Varyans
S	Çarpıklık
K	Basıklık
μ	Ortalama
\mathbf{x}	Veri vektörü
M	İletilen frekans sayısı
dB	Desibel
dBm	Güç düzeyinin 1 mW referansına göre desibel değeri
$X(k)$	Ayrık Fourier dönüşümü
F	İletilen frekans aralığı uzunluğu
x_1	Hedefe iletilen tek-tonlu sinyal
s_1	Tek-tonlu sinyal iletiminde hedeften geri-ışığıyan sinyal
b_i	i. b katsayısı (Tek-tonlu durum için)
x_2	Hedefe iletilen iki-tonlu sinyal
s_2	İki-tonlu sinyal iletiminde hedeften geri-ışığıyan sinyal
c_i	i. c katsayısı (İki-tonlu durum için)
\mathbf{r}	Geri-ışığıyan sinyal vektörü
\mathbf{H}	Gözlem matrisi
$\boldsymbol{\theta}$	Bilinmeyen deterministik parametre vektörü

Simgeler**Açıklama**

\mathbf{w}	Gürültü vektörü
\mathbf{C}	Kovaryans matrisi
$p(\mathbf{r}; \boldsymbol{\theta})$	Geri-ışık sinyalin olasılık yoğunluk fonksiyonu
λ	Tahmini hata
$\hat{\boldsymbol{\theta}}$	Tahmini parametre vektörü
ω_1	İletilen 1. frekans
ω_2	İletilen 2. frekans
Nu	İdeal diyota ne kadar yaklaşıldığını ifade eden parametre
I_0	Diyotun doyma akımı
T	Sıcaklık
\hat{x}	Normalize edilmiş veri
σ	Standart sapma

1. GİRİŞ

İnsan yapımı elektronik cihazların büyük çoğunluğunu Doğrusal Olmayan Eklem (NLJ) içeren elektronik devreler oluşturmaktadır. Diyot, transistör, yükselteç, yarı iletkenler, vb. yaygın olarak kullanılan devre elemanları NLJ yapısındadır. Bu nedenle, çoğu devreler doğrusal olmayan davranışlar sergilemektedir. Doğrusal Olmayan Eklemler, üzerine gelen elektromanyetik dalganın harmonik frekanslarını içeren elektromanyetik dalgayla yeniden ışıma yapar. Günümüzde birçok elektronik cihazın yapısında yaygın olarak kullanılan NLJ'ler bu özellikleri sayesinde elektronik devrelerin Radyo Frekansı (RF) yayını ile tespit ve sınıflandırılabilmesine olanak sağlar. Bu amaçla, doğrusal olmayan radar ya da harmonik radarlar kullanılmaktadır. Harmonik radarın ana fikri, gönderilen dalganın frekansının harmoniklerinde sinyal alıp işlemesidir. Bu sebeple mikrodalga frekanslarında, harmonik frekans bilgilerinden yola çıkarak elektronik devreleri harmonik radar ile ayırt etmek önemli bir problemdir. Bu tezde, yeni sinyal işleme, öznetelik geliştirme ve makine öğrenme teknikleri ile elektronik devrelerin tespitinin yanında nasıl bir devre içeriğine sahip oldukları bilgisini sunan ve elektronik devreleri sınıflandırabilen bir yöntem oluşturulması amaçlanmaktadır.

Özellikle Nesnelerin İnterneti (Internet of Things) çağında, doğrusal olmayan devre elemanlarından oluşan elektronik cihazların sınıflandırılması büyük önem kazanmaktadır. Nesnelerin İnterneti sayesinde neredeyse bütün cihazlar ve nesneler kablosuz ağ üstünden veri aktarımı yapabilen elektronik devre donanımları içerecek ve bu devreler mutlaka NLJ barındıracaktır. Cihazların ve nesnelerin birbirlerine olan etkilerinin modellenmesi ve spektrumun izlenmesinde NLJ'lerden geri-ışıma olgusunun kavranması önem arz edecektir [1].

Ortam dinleme cihazlarının tespiti ve sınıflandırılması, harmonik radarın önemli bir örnek uygulama alanı olarak ele alınabilir. Bugüne kadar, bir ortamdaki ortam dinleme cihazlarının sadece varlığının tespitine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Ancak, varlığı

tespit edilen ortam dinleme cihazlarının devre içeriği bilgisine erişilememektedir. Dolayısıyla, bu cihazların bir mekandaki varlığının tespitinin ötesinde güvenlik, emniyet, istihbarat ve benzeri stratejik önem gösterebilen devre içeriği bilgilerine erişilmesi de çok önemlidir.

1.1 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Devrelerin Tanımlanması

Harmonik radar veya doğrusal olmayan radar, doğrusal olmayan hedeflerden saçılan elektromanyetik (EM) dalganın harmonik tepkisinden yararlanan bir teknolojidir [2, 3]. Doğrusal olmama durumu elektronik devrelerde temel bir olgudur. Bir devrenin doğrusal olup olmadığı akım-gerilim (I-V) eğrisi ile belirlenir. I-V eğrileri, devreden geçen akım ile terminalleri arasına uygulanan gerilim değeri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Örneğin, bir dirence ait I-V karakteristik grafiği, Ohm yasasına göre dirence uygulanan gerilim ile ortaya çıkan elektrik akımı arasında doğrusal bir ilişki sergilemektedir [4]. Doğrusal olmayan devre elemanlarından olan diyota ait I-V eğrisi ise doğrusal olmayan bir davranış gösterir [5].

Tüm elektronik cihazlar ve içindeki devreler, gelen bir EM dalgasına doğrusal olmayan bir tepki sunar [6]. Bunun nedeni, yarı iletkenler, diyotlar, transistörler, yükselticiler, karıştırıcılar, vb. doğrusal olmayan devre bileşenlerinin doğrusal olmayan akım-gerilim ilişkisi göstermesidir [7]. Dolayısıyla, bu doğrusal olmayan I-V karakteristiği, elektronik devrelere ve cihazlara çarpan dalganın harmonik frekanslarında geri-ışınım sağlar [3, 8, 9]. Ek olarak, metal-metal kontaklar gibi birçok metal hedefler de doğrusal olmayan özellikler gösterir [10, 11]. Ayrıca doğrusal devre elemanları da ısınmaya maruz kaldıklarında doğrusal olmayan davranışlar sergileyebilirler.

Doğrusal devreler, süperpozisyon ilkesinin geçerli olduğu devreler olarak tanımlanır [7]. Spesifik olarak, x_1 ve x_2 uyarıları sırasıyla y_1 ve y_2 yanıtlarına sahip bir devreye ayrı ayrı uygulanırsa, $ax_1 + bx_2$ uyarımına yanıt $ay_1 + by_2$ olur, burada a ve b zamanda değişmez veya zamanda değişen, gerçek veya karmaşık olabilen rastgele sabitlerdir. Bu kriter, devrelere veya sistemlere uygulanabilir. Bu tanım, doğrusal bir devrenin veya

sistemin yanıtının yalnızca uyarım dalga formlarında bulunan frekansları içerdiğini söylemektedir. Böylece doğrusal devreler yeni frekanslar üretmez. Doğrusal olmayan devreler ise genellikle dikkate değer ölçüde yeni frekans bileşenleri ürettiğinden, bu kriter doğrusal ve doğrusal olmayan devreler arasında önemli bir farklılık sağlamaktadır.

1.2 Doğrusal Olmayan Hedeflerden Harmonik Geri-Işıma

Doğrusal olmayan bir hedeften geri-ışık sinyal, diğer bir ifadeyle hedefin harmonik cevabı, Taylor serisi ile ifade edilmektedir [7, 12]:

$$s_{out}(t) = \sum_{p=1}^{\infty} a_p s_{in}^p(t) \quad (1.1)$$

Burada, s_{in} hedefe gelen dalgayı, s_{out} hedeften geri-ışık dalgayı, a_p 'ler ise kompleks güç serisi katsayılarını temsil etmektedir. a_1 hedefin doğrusal tepkisine karşılık gelirken, $\{a_2, a_3, \dots\}$ harmoniklerin doğrusal olmayan katsayılarıdır.

Tek-tonlu ve sıfır fazlı gelen bir dalga karmaşık üstel olarak Eşitlik (1.2) ile gösterilmektedir:

$$s_{in}(t) = \frac{s_0}{2} (e^{jw_0t} + e^{-jw_0t}) \quad (1.2)$$

Burada, s_0 gelen dalganın genliği ve w_0 ise iletilen sinyalin temel frekansdır. Eşitlik (1.2), Eşitlik (1.1)'e uygulandığında, hedeften geri-ışık dalga Eşitlik (1.3) ve Eşitlik (1.4)'te ifade edildiği gibi $w_0, 2w_0, 3w_0, \dots$ 'deki sinüzoidlerin toplamı şeklindedir:

$$s_{out}(t) = a_1 \frac{s_0}{2} (e^{jw_0t} + e^{-jw_0t}) + a_2 \left[\frac{s_0}{2} (e^{jw_0t} + e^{-jw_0t}) \right]^2 + a_3 \left[\frac{s_0}{2} (e^{jw_0t} + e^{-jw_0t}) \right]^3 + \dots \quad (1.3)$$

$$s_{out}(t) = a_1 s_0 \cos(\omega_0 t) + \frac{a_2 s_0^2}{2} (1 + \cos(2\omega_0 t)) + \frac{a_3 s_0^3}{4} (3\cos(\omega_0 t) + \cos(3\omega_0 t)) + \dots \quad (1.4)$$

Eşitlik (1.4)'e göre $(1 + \cos(2\omega_0 t))$ ifadesi ikinci harmoniğin, giriş genliğinin karesi ile ve $\cos(3\omega_0 t)$ ise üçüncü harmoniğin, giriş genliğinin kübü ile orantılı olarak arttığını ifade etmektedir.

1.3 Literatür Araştırması

Doğrusal radarların çalışma prensibi, gönderilen sinyal ile aynı frekanstaki sinyallerin tespit edilmesine dayanırken, harmonik radarların temel çalışma prensibi ise bir veya birden fazla frekansta elektromanyetik dalga iletmeye ve bu frekansların harmonikleri veya doğrusal kombinasyonu sonucu ortaya çıkan arakiplenim frekanslarını tespit etmeye dayanmaktadır [13].

Gerçek hayatta radarların hedefleri tespit ettiği ortamlar, hedef dışı yansımalar (clutter) bakımından zengin ortamlardır. Hedef dışı yansımalar, iletilen sinyalin frekanslarında meydana gelir. Ancak harmonik radarda iletilen sinyalin harmonik frekanslarındaki RF dalgalar kullanıldığından gürültülerin yüksek oranda bastırılması sağlamaktadır [13, 14]. Ayrıca doğrusal radarda gönderilen sinyal ile aynı frekansa sahip yansıyan bir dalga incelenirken, doğrusal olmayan yani harmonik radar ile gönderilen dalganın harmonik bileşenlerine de ulaşılabilir. Böylece harmonik radar sayesinde hedef ile ilgili daha çok bilgiye ulaşabilmek mümkün olmaktadır [3, 15]. Öte yandan harmoniklerde alınan sinyallerin güç değerleri düşüktür. Bu nedenle, alıcıda daha yüksek sinyal gürültü oranı (SNR) sağlamak için iletim gücünün yüksek olması gerekir [16].

Doğrusal olmayan hedeflerden geri-ışık sinyallerin harmonik frekanslarının kullanılması harmonik radar için önemli uygulama alanları sunar. Bu uygulamalardan birisi otomotiv endüstrisine ait olup, bu çalışmada, harmonik radar ile yüksek riskli

hedefleri belirleyerek ölümcül kazaları önlemek için otomobillerde ve insanlarda doğrusal olmayan etiketler kullanılmaktadır [17]. Bir başka uygulama alanı ise tarımda böceklerin mahsule vereceği zararın önlenmesine aittir [18–27]. Böceklere yerleştirilen uyumlu doğrusal olmayan etiketler sayesinde böceklerin ortamdaki tespiti ve takibi yapılarak tarım ürünlerine zarar vermeleri engellenmektedir. Harmonik radar ile arıların davranışları da gözlemlenebilmektedir [28–30]. İşçi arıların ortadan kaybolması, yiyecek sıkıntısına yol açacağından, arılar üzerine yerleştirilen doğrusal olmayan etiketler ile arıların davranışı izlenebilmektedir. Ayrıca, yeraltı hedeflerinin konumunu tespit etmek, harmonik radarın başka bir uygulamasıdır. Doğal gaz ve rafine petrol gibi enerji kaynakları yeraltı boru hatları ile taşınmaktadır. Bu boru hatlarının kentsel alanlardaki konumlarını doğru bir şekilde belirlemek zordur. Bu nedenle, karmaşık yeraltı boru hattı ağının yerlerini tespit etmek için harmonik Radyo Frekans ile Tanımlama (RFID) etiketleri kullanılmakta ve bu da kazı sırasında boru hatlarının kazara kırılmasını en aza indirmektedir [31]. Harmonik RFID sistemleri, düşük kendi kendine parazit oluşturma, doğru konum bilgisi ve faz gürültüsüne karşı yüksek direnç sağladığı için bu ve diğer birçok uygulamada kullanılabilir [32]. Buna ek olarak, harmonik radar, hedef dışı yansımalarla zengin ortamlarda gizli patlayıcıları, silahları ve diğer insan yapımı nesnelere tespit etmek gibi güvenlik ve askeri uygulamalarda önemli bir kullanıma sahiptir [33–39]. Bu sayede harmonik radar, elektronik harp alanında da önemli ve gelişmekte olan bir uygulamaya sahiptir.

Elektronik hedeflerin tespiti, harmonik radarın en popüler uygulamalarından biridir. Hedeflere farklı tipte dalga biçimleri iletilerek doğrusal olmayan cihazlardan geri-ışık sinyaller analiz edilmektedir. Test hedefine tek-tonlu bir dalga formu iletmek ve temel frekansın harmoniklerini analiz etmek harmonik radarda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir [8, 9, 13, 18–23, 25, 40–44]. Diğer bir yöntem ise hedeflere iki-tonlu bir sinyal iletmek ve iletilen frekansların hem harmoniklerini hem de arakiplenim terimlerini analiz etmektir [17, 33, 38, 40, 44–46]. Bu teknik ile daha dar bir bant genişliğine sahip bir alıcı ile hedef tespiti sağlanmaktadır [15]. Ayrıca, dar bant genişlikli bir alıcı kullanıldığında elektronik cihazları tespit etmek ve ayırt etmek için çok tonlu sinyaller aynı anda hedeflere iletilebilir ve alıcıda

hem harmonikler hem de arakiplenim tonları toplanabilir [13, 15, 46]. Arakiplenim ürünleri kullanılarak hedefin menzilin belirlenmede yardımcı olan büyüklük ve faz bilgilerinden yararlanılmaktadır [46]. [46, 47]'te ise iki elektronik hedefi ayırt etmek için eş zaman frekanslı harmonik bir radar gösterilmiştir. Ayrıca, doğrusal frekans modülasyonlu cıvıltı (chirp) sinyalleri [13, 14, 40, 46, 48] ve kademeli frekans darbeleri [13, 14, 40, 46, 49–51] hedeflere iletilerek hedeflerin hem tespit edilmelerini hem de menzillerinin belirlenmesini sağlamaktadır. Ayrıca, [52]'de elektronik cihazları harmonik radar kullanarak uzaktan tespit etmek için bir taşıyıcı modülasyon tekniğinden yararlanılmıştır. Verici tek bir frekansı iletirken, doğrusal olmayan hedef tarafından hem iletilen frekansın hem de cihazın emisyonunun arakiplenim ürünleri saçılmaktadır. Bir başka çalışmada ise dijital olarak modüle edilmiş bir sinyal hedeflere iletilerek iletim gücü verimliliği artırılır ve daha fazla gürültü bastırma olanağı sunmaktadır [53]. Başka bir yöntem, cihazları diğer metallere ayırt etmek için ikiz ters çevrilmiş darbeler (bir başka ifadeyle özdeş darbeler fakat ters fazda darbeler) kullanılmaktadır [54]. Bu çalışmada, açık ve kapalı konumlarında olan ve geçerli bir SIM kart içeren iki farklı cep telefonu modeli, ikiz ters çevrilmiş darbe radarı ile test edilerek ayırt edilmektedir. [55]'te, hedeflere hibrit bir akustik EM dalgası iletilerek elektronik ve metalik cihazlar tespit edilmektedir.

Elektronik cihazların tespiti, menzili ve takibine odaklanan birçok çalışma olmasına rağmen, harmonik radar kullanarak elektronik cihazların ayırt edilmesi ve sınıflandırılması konusunda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürde ilk olarak elektronik cihazlar alıcı antenlere olan mesafeleri değiştirilerek yani hedeflerin önceden belirlenmiş konumlarda çapraz ve aşağı-yukarı konumlarda hareket ettirildiği bir deney düzeneğinde hedeflerin tespiti ve sınıflandırılması yapılmıştır [12]. Hedeflerin harmonik tepkilerini toplayabilmek için on altı alıcı anten kullanılmıştır. Bu çalışmada sunulan yöntemde, birçok alıcı anten tarafından toplanan sinyallerin minimum, maksimum, ortalama ve standart sapma değerleri hesaplanarak hedefler karakterize edilmektedir. Daha sonra birbirinden farklı elektronik cihazları ayırt etmek ve sınıflandırmak için test edilen elektronik devrelere değişen güçte tek-tonlu sinyaller iletilmiştir. [8] çalışmasında, hedeflere tek-tonlu ve güç süpürmeli sinyal iletilerek

hedeflerden geri-ışığıyan sinyallerin ortalama, varyans, çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis) gibi istatistiksel öznitelikler elde edilmiş ve bu öznitelikler kullanılarak cihazlar birbirinden ayırt edilmiştir. Cihazlara ait ikinci, üçüncü ve dördüncü harmoniklerde alınan güçler analiz edilerek cihazların ayırt edici performansını ölçebilmek için istatistiksel özniteliklerin Öklid uzaklıkları kullanılmıştır. Bir başka çalışmada ise ikinci, üçüncü ve dördüncü harmonik frekanslarında alınan güç eğrilerinin Fourier dönüşümlerinin düşük, orta ve yüksek frekanslarındaki enerji seviyeleri elektronik devreleri birbirinden ayırt etmede kullanılmıştır [9]. [43]'de ikinci, üçüncü ve dördüncü harmoniklerde alınan güç değerleri kullanılarak istatistiksel ve Fourier öznitelikleri ile çeşitli elektronik devreler gürültü varlığında sınıflandırılmıştır. Farklı bir açıdan, tek-tonlu iletim durumu için devreleri ayırt etmede kullanılacak bilinmeyen deterministik parametre vektörünü tahmin etmek için doğrusal bir model geliştirilmiştir [42]. Bu yeni geliştirilmiş doğrusal model, analitik açıdan bir gözlem matrisi ve deterministik bir parametre vektörü ile ölçümleri temsil etmektedir.

1.4 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, doğrusal olmayan yapıdaki hedeflerden geri-ışığıyan sinyallerin analiz edilmesiyle, bu yapıdaki birbirinden farklı elektronik devrelerin tespiti ve sınıflandırılmasına yönelik yeni ve etkin metotlar geliştirilmiştir. Bu kapsamda, öncelikle hedeflere iletilecek sinyalin dalga biçiminin belirlenmesi gerekmektedir. Literatür çalışmalarında tek-tonlu ve eşzamanlı olarak çok-tonlu sinyaller hedeflere iletilmektedir. Ancak bu çalışmalar elektronik devrelerin sadece varlığının tespitine yönelik çalışmalardır.

Bu tez kapsamında, NLJ yapısına sahip devrelerin belirli bir doğrusal olmayan davranış sergilediği fikrine dayanarak, aynı türden devrelerin ortak bir harmonik tepkiye sahip olmasını ve farklı türdeki devrelerin ise farklı harmonik tepkilere sahip olması beklenmektedir. Bu düşünceden yola çıkarak hedeften geri-ışığıyan sinyalleri ayırt edecek öznitelikler elde edilmiştir. Bu kapsamda, hedeflerden geri-ışığıyan sinyallerin harmonik cevaplarından varyans, çarpıklık (skewness) ve basıklık (kurtosis)

gibi istatistiksel parametreler elde edilmiştir. Ayrıca devrelerden geri-ışığıyan sinyallerin Fourier uzayında incelenmesiyle farklı türdeki devreleri karakterize etmeye yarayacak öznitelikler elde edilip bu öznitelikler doğrusal olmayan yapıdaki hedeflerin ayrıştırılması ve sınıflandırılmasında kullanılmıştır. Hedeflerden geri-ışığıyan dalgaların harmonik cevapları, istatistiksel ve frekans alanında çıkarılan öznitelikler kullanılarak, sınıflandırma performansı sonuçları hem harmonik hem de öznitelik uzaylarında incelenerek doğrusal olmayan devreler sınıflandırılmıştır.

Harmonik radarın en önemli uygulama alanlarından birisi günümüzde yaygın olarak kullanılan ortam dinleme cihazlarının tespitidir. Bu tezde sunulan yeni metotlar sayesinde ortam dinleme cihazlarının varlığını tespit etmenin yanı sıra devre içeriği bilgisine de ulaşmak mümkün olmaktadır. Böylece emniyet, güvenlik ve istihbarat gibi çeşitli amaçlar için önemli olabilecek devre içerik bilgilerine de ulaşmak mümkündür.

1.5 Organizasyon

Tez çalışması, beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1’de doğrusal olmayan devreler ve harmonik radar konusuna giriş yapılmaktadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan devreler tanımlanmakta ve doğrusal olmayan bir hedeften elde edilen harmonik geri-ışığıma olgusu açıklanmaktadır. Ayrıca tezde sunulan çalışmaya ait literatürde yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilip bu tezin amacı ve literatürdeki çalışmalardan ayıran özgün kısımlarından bahsedilmektedir. Bölüm 2’de, bu tez kapsamında sunulan özgün FSHR yaklaşımı ve bu yaklaşım ile elektronik devrelerin sınıflandırılmasında kullanılan öznitelikler açıklanmaktadır. Daha sonrasında, sunulan yöntem ile elde edilen benzetim sonuçları verilerek literatürdeki mevcut yöntemlerle sınıflandırma performanslarının karşılaştırılması verilmektedir. Bölüm 3’te, yeni öznitelik kümelerinin oluşturulması ve bu öznitelik kümelerinin sınıflandırma performanslarından bahsedilmektedir. Bölüm 4’te yeni bir doğrusal model geliştirilmekte ve bu model kullanılarak tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumları için elektronik devrelerin sınıflandırılması gerçekleştirilmektedir. Son bölümde ise sonuçlar ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalar sunulmaktadır.

2. FREKANS SÜPÜRMELİ HARMONİK RADAR YAKLAŞIMI İLE ELEKTRONİK DEVRELERİN SINIFLANDIRILMASI

2.1 Frekans Süpürmeli Harmonik Radar

Harmonik radarla iletilen bir dalga doğrusal olmayan bir hedefe çarptıktan sonra gelen dalganın harmonik frekanslarında doğrusal olmayan hedef üzerinde indüklenen akımlar nedeniyle geri-ışığa meydana gelir. Doğrusal olmayan bir hedeften yayılan sinyal, hem temel frekansı hem de temel frekansın tam sayı katlarını içermektedir. Öte yandan, doğrusal bir hedefin yanıtı yalnızca temel frekans bileşenlerini içermektedir [13]. Bu durum harmonik radar çalışmaları için ana başlangıç noktasıdır. Bölüm 1.2’de bahsedildiği gibi doğrusal olmayan bir cihazdan yeniden yayılan sinyal, diğer bir deyişle harmonik yanıt, Taylor serisi modeli ile temsil edilmektedir:

$$s_{out}(t) = \sum_{p=1}^{\infty} a_p s_{in}^p(t) = a_1 s_{in}(t) + a_2 s_{in}^2(t) + a_3 s_{in}^3(t) + \dots \quad (2.1)$$

Burada, s_{out} hedeften geri-ışık dalgası, s_{in} hedefe gelen dalga ve a_p ’ler ise kompleks güç serisi katsayılarıdır. a_1 hedefin doğrusal tepkisini, $\{a_2, a_3, \dots\}$ ise harmoniklerin doğrusal olmayan katsayıları temsil etmektedir.

Bu çalışmada sunulan Frekans Süpürmeli Harmonik Radar (FSHR) yaklaşımında, iletilen sinyalin frekansı belirli bir aralıkta süpürülerek devrelerin doğrusal olmayan karakteristikleri elde edilmektedir. Yüksek dereceli harmonik frekanslarda geri-ışık sinyaller zayıf olduğundan, elektronik devreleri sınıflandırmak için ilk üç harmonikte elde edilen sinyaller kullanılmaktadır.

Frekans süpürmeli sıfır fazlı giriş sinyali şu şekilde ifade edilebilir:

$$s_{in}(t) = x_0 \sin(w_i t), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2.2)$$

Burada, x_0 iletilen sinyalin genliği ve w_i ise anlık iletilen frekanstır. M frekansları, belirlenen bir frekans aralığında sabit basamak boyutuyla değişmekte ve M frekansları eşzamanlı olarak değil, sırayla hedeflere iletilmektedir.

Hedeften saçılan sinyal, Eşitlik (2.2)'nin Eşitlik (2.1)'de yerine koyulmasıyla elde edilir. Hedeften geri-ışışyan dalğanın birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerdeki ifadesi Eşitlik (2.3)'de gösterilmektedir:

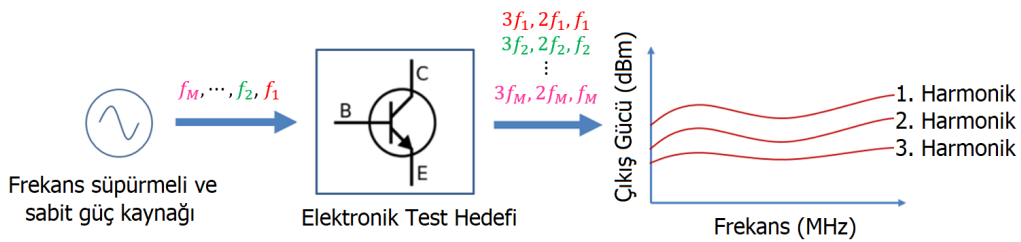
$$s_{out}(t) \approx a_1 x_0 \sin(w_i t) + a_2 [x_0(\sin(w_i t))]^2 + a_3 [x_0(\sin(w_i t))]^3$$

$$s_{out}(t) \approx a_1 x_0 \sin(w_i t) + a_2 \frac{x_0^2}{2} - a_2 \frac{x_0^2 \cos(2w_i t)}{2} + a_3 \frac{3x_0^3 \sin(w_i t)}{4} - a_3 \frac{x_0^3 \sin(3w_i t)}{4} \quad (2.3)$$

Bu eşitlikte, $i = 1, 2, \dots, M$ 'dir.

Sinyallerin iletilen frekansın harmoniklerinde doğrusal olmayan hedeften geri-ışışması, hedefin harmonik karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Farklı elektronik devre türleri, ayırt edici harmonik karakteristiklere sahipken, benzer türdeki devreler benzer harmonik davranışlara sahiptir. Böylece, elektronik cihazların bu kendilerine özgü harmonik cevapları, farklı tipteki devrelerin sınıflandırılmasını sağlamaktadır.

Frekans süpürmeli harmonik radar yaklaşıma ait şema Şekil 2.1'de sunulmaktadır. Şekil 2.1'deki gibi sabit güce sahip frekans süpürmeli bir kaynaktan, frekanslar sırayla elektronik devrelere iletilmekte ve birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerde alınan sinyal güçleri analiz edilmektedir.



Şekil 2.1: Frekans süpürmeli harmonik radar yaklaşımı.

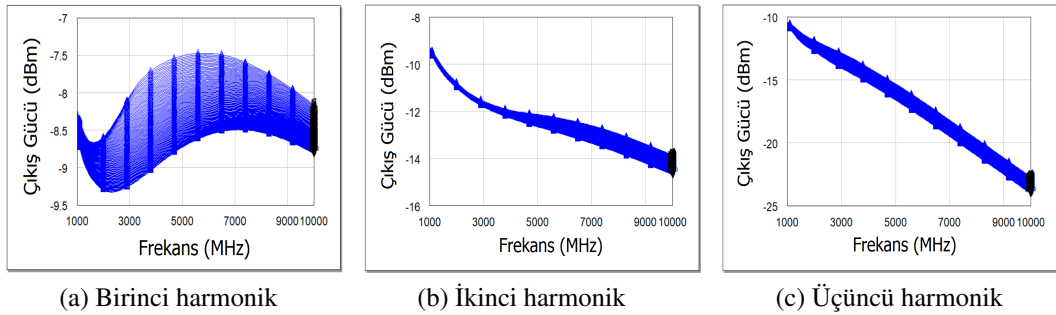
2.2 Elektronik Devrelerin Sınıflandırılmasında Kullanılan Öznitelikler

Elektronik devrelerin harmonik karakteristikleri, test edilen elektronik devrelerin her birine sabit güçte ve frekans süpürmeli sinyallerin iletilmesiyle elde edilmektedir. İlk üç harmonik frekansta toplanan sinyallerin güç değerleri, devrelerin sınıflandırılmasında kullanılacak istatistiksel ve Fourier özniteliklerini elde etmek için kullanılmaktadır.

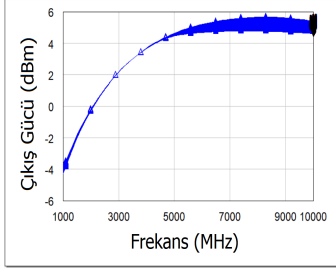
2.2.1 İstatistiksel öznitelikler

Elektronik devreleri sınıflandırmada kullanılan öznitelik setlerinden biri alıcıda toplanan sinyalleri tanımlamaya yarayan istatistiksel özniteliklerdir. Bu çalışmada kullanılan istatistiksel öznitelikler, Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilen ilk üç harmonikte toplanan çıkış gücü eğrilerinin varyans, çarpıklık ve basıklığıdır. Bu parametreler güç eğrilerinin dağılımının şeklini tanımlamakta ve çeşitli elektronik devreleri sınıflandırmak için ayırt edici özellikler sağlamaktadır.

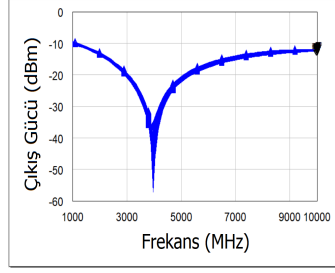
Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilen birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerdeki alınan güç eğrilerinin her biri, bir veri vektörü $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ olarak tanımlanır. Burada x_M önceden belirlenmiş iletilen frekans aralığı içindeki son frekans değerinde elde edilen güç değeridir. Burada x_1 , aralık içindeki birinci frekans değerine karşılık gelen birinci çıkış gücü değerini, x_2 , aralık içinde iletilen ikinci frekansa karşılık gelen ikinci çıkış gücünü göstermektedir, vb.



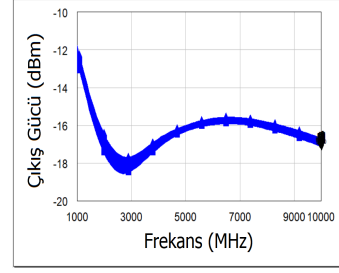
Şekil 2.2: Çok katlı yükselteç devrelerinin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde alınan güç eğrileri.



(a) Birinci harmonik

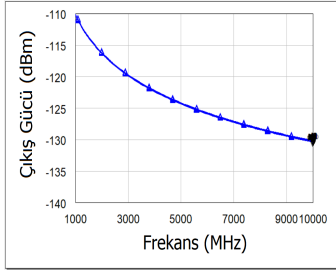


(b) İkinci harmonik

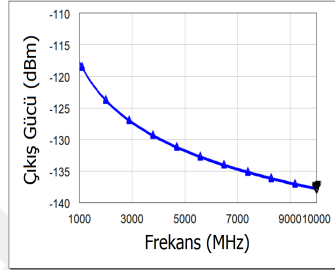


(c) Üçüncü harmonik

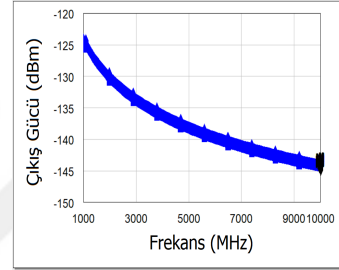
Şekil 2.3: Ortak emitörlü yükselteç devrelerinin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde alınan güç eğrileri.



(a) Birinci harmonik



(b) İkinci harmonik



(c) Üçüncü harmonik

Şekil 2.4: Testere dişi osilatör devrelerinin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde alınan güç eğrileri.

\mathbf{x} veri vektörünün varyansı, çarpıklığı ve basıklığı Eşitlik (2.4)'te ifade edilmiştir [56]:

$$\sigma^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (x_i - \mu)^2; \quad S = \frac{1}{M} \frac{\sum_{i=1}^M (x_i - \mu)^3}{\sigma^3}; \quad K = \frac{1}{M} \frac{\sum_{i=1}^M (x_i - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (2.4)$$

Yukarıdaki ifadelerde, μ ve σ sırasıyla veri vektörü \mathbf{x} 'in ortalama ve standart sapmalarını gösterir. Varyans, veri vektöründeki M örnek arasındaki yayılmanın bir ölçüsüdür. Çarpıklık ise bir örneklem ortalaması etrafındaki dağılımın asimetrisi olarak tanımlanır. Dağılımın tepe keskinliği ve kuyruk uzunluğu ise basıklık ile ölçülmektedir.

Yukarıda bahsedilen istatistiksel öznitelikler, iletilen çeşitli sinyal frekanslarına göre toplanan sinyal güçlerinin harmonik karakteristiklerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu öznitelikler, farklı elektronik devreler için ayırt edicidir ve bu nedenle, sınıflandırmada fayda sağlamaktadır. Ancak, dağılımların istatistiksel özniteliklerini kullanmak, frekans içeriği ile ilgili bilgileri kaybetmektedir. Bu nedenle,

aşağıdaki bölümde bahsedilen Fourier öznitelikler geliştirilmektedir.

2.2.2 Fourier öznitelikler

Bölüm 2.2.1’de açıklanan istatistiksel öznitelikler, iletilen çeşitli sinyal frekanslarından kaynaklı geri-ışyan sinyal gücünün dağılımıyla ilgili bilgi sağlamaktadır. Ancak, istatistiksel öznitelikler kullanıldığında bu eğrilerin frekans içeriğine karşılık gelen bilgiler kaybolmaktadır. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’teki geri-ışyan sinyal güç eğrilerinin frekans içeriği, elektronik devrelerin ayırt edici harmonik karakteristikleri hakkında yararlı ek bilgiler sağlamaktadır. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te verilen harmoniklerdeki güç eğrilerinin Fourier uzayında analiziyle farklı elektronik devre türleri karakterize edilmekte ve sınıflandırılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus, bu güç eğrilerinin birer dağılım olarak kabul edilmesidir. Yani, geri-ışyan sinyallerin, iletilen sinyalin farklı frekanslarına karşılık gelen güç değerlerinin, zamanda ölçüldüğü varsayılmaktadır. Frekans alanındaki bu dağılımları tanımlamak için Ayırık Fourier Dönüşümü (DFT) uygulanmaktadır. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4’te alınan her bir güç eğrisini temsil eden veri vektörü $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ ’in DFT’si şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\mathbf{X}(k) = \sum_{n=1}^M \mathbf{x}_n e^{-j2\pi(k-1)(n-1)/M} \quad (2.5)$$

Bu ifadede, $k = 1, \dots, M$ ve M belirlenen frekans aralığının uzunluğunu göstermektedir.

Fourier dönüşümü ile elde edilen frekans içeriği, elektronik devreleri sınıflandırmak için kullanılmaktadır. Düşük, orta ve yüksek frekans seviyeleri olacak şekilde alınan güç eğrilerinin Fourier dönüşümleri üç farklı frekans seviyesine ayrılır ve her bir frekans seviyesindeki enerji değerleri hesaplanır. Bu öznitelik, toplam enerjinin ne kadarının ilgili frekans seviyesinde olduğunu göstermekte ve elektronik devreler için ayırt edici bilgiler sağlamaktadır.

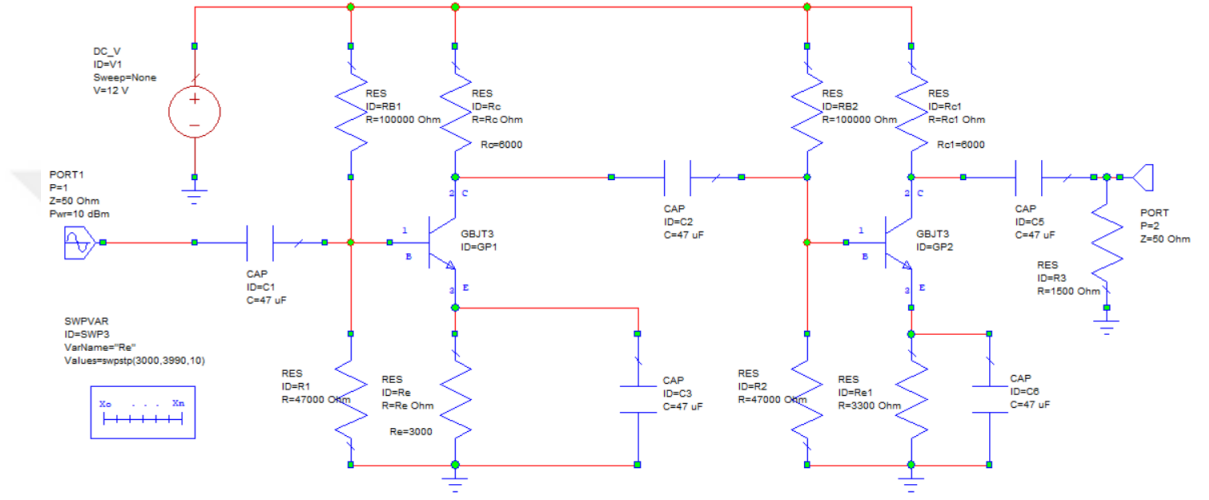
2.3 Deneysel Tasarım ve Benzetimler

Bu çalışmada sunulan yöntemin performansını analiz etmek için çok katlı yükselteç, ortak emitörlü yükselteç ve testere dışı osilatör devreleri tasarlanmıştır. Her bir devrenin barındırdığı İki Kutuplu Eklem Transistörü (BJT), bu devrelerin harmonik geri-ışınma yapmasına neden olmaktadır. Cadence AWR Mikrodalga Ofis programındaki Harmonik Denge (Harmonic Balance) simülatörü kullanılarak devrelerin harmoniklerdeki sinyal güçleri toplanmaktadır. AWR Mikrodalga Ofis programı, doğrusal olmayan hedeflerin gerçek harmonik tepkilerini sağlamaktadır. Dolayısıyla, devrelerdeki elementlerin bağlaşım (coupling) problemleri ve diğer olası harmonik cevap kaynakları gibi gerçek verilerdeki sorunlar, AWR programı ile elde edilen çıkış gücü eğrilerinde mevcut olarak sunulmaktadır. Antenler ve serbest uzay yayılımı, benzetim kurulumunda dikkate alınmamaktadır. Fakat buradaki önemli bir husus, bu çalışmada kullanılan özneliklerin, antenlere ve serbest uzay yayılıma bağlı olmamasıdır. Bu çalışmadaki yöntem, belirli elektronik devre türleri için gösterilmiş olsa da harmonik geri-ışınmaya neden olabilecek doğrusal olmayan yapıdaki başka elektronik devreler de kullanılabilir.

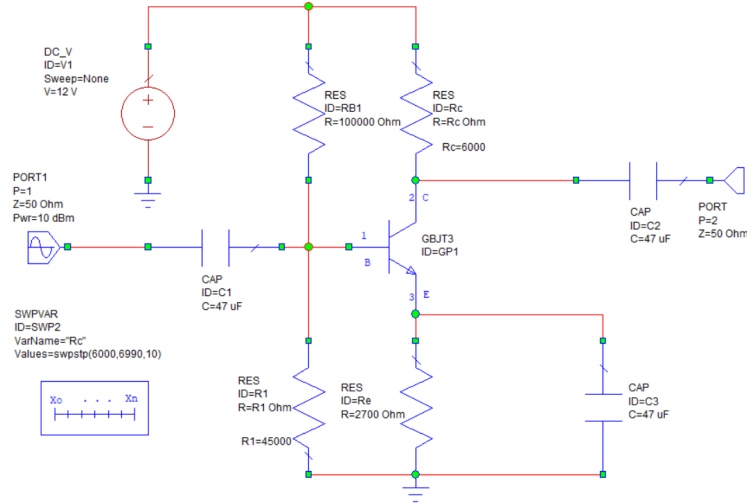
Bu çalışmada, çok katlı yükselteç, ortak emitörlü yükselteç ve testere dışı osilatör devreleri test devreleri olarak belirlenmiştir. Ortak emitörlü yükselteçler, sinyal gücünü arttırdıklarından ve girişin 180° faz kaymasını sağladıklarından dolayı ses ve radyo frekansı uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen devrelerdir [57, 58]. Çok katlı yükselteçler ise sinyal kuvvetlendirmesini iyileştirerek yüksek kazançlar sağlamaktadırlar. Yüksek kazanç gerektiren ses ve RF yükselteçleri, doğru çalışabilmeleri için çok katlı sistemlerden oluşmaktadır [59]. Testere dışı osilatörler, girişlerine uygulanan kare dalgaları testere dışı dalga formuna çeviren ve yaygın olarak devrelerdir. Testere dışı dalga formları, test cihazları, kontrol sistemleri, vb. elektronik sistemler tarafından kullanılmaktadır [60].

Bu çalışmada kullanılan elektronik devre türlerinin şemaları, Şekil 2.5, Şekil 2.6 ve Şekil 2.7'da verilmektedir. AWR Mikrodalga Ofis programında Süpürülmüş Değişken Kontrolü (SWPVAR) kullanılarak, üç farklı devre tipi için 100'er devrelik

bir veri seti oluşturulmaktadır. Rastgele seçilen devre parametrelerinin değerleri, SWPVAR elementi kullanılarak, her bir devre sınıfı için farklı devreler oluşturmak üzere süpürülmektedir. Gerçek hayatta bir ortamda bulunan devrelerin içeriği bilinemeyeceğinden, burada kullanılan devre tipleri ve her birinden elde edilen çeşitli varyasyonlardaki devreler rastgele seçilmektedir. Bu çalışmadaki asıl amaç, tüm devre setlerinden geri-ışık harmonik cevapları toplamaktır. Bu nedenle, bu çalışmada sunulan yöntem herhangi bir doğrusal olmayan devre tipine uygulanabilir.

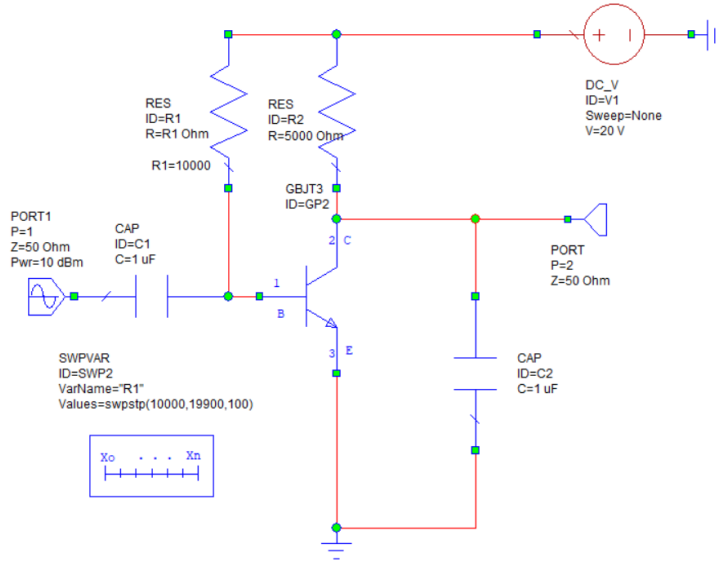


Şekil 2.5: Çok katlı yükselteç devre şeması.



Şekil 2.6: Ortak emittörlü yükselteç devre şeması.

Doğrusal olmayan yapıdaki elektronik devrelere, 10 dBm'lik sabit güce sahip frekans süpürmeli bir sinyal gönderilmektedir. Devrelerin doğrusal olmayan karakteristiklerini



Şekil 2.7: Testere dişi osilatör devre şeması.

elde etmek için giriş frekansı, 1000 MHz'den 10.000 MHz'e 90 MHz'lik adımlarla değiştirilmektedir. Bu çalışmada, gönderilen sinyalin çalışma frekans aralığı ve gücü rastgele olarak seçilmiştir. Ancak, burada sunulan yöntem, herhangi bir frekans aralığına ve giriş gücüne uygulanabilir. Çok katlı yükselteç, ortak emitörlü yükselteç ve testere dişi osilatör devrelerine ait birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerdeki alınan güç eğrileri Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te toplanan güç değerleri, gürültüsüz duruma ait harmonik sinyallerdir. Performans analizinin gerçekleştirildiği benzetimlerde ise, harmoniklerdeki güç sinyallerine Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü (CWGN) eklenmektedir. CWGN altında toplanan harmonik sinyallerden, Bölüm 2.2'de açıklanan öznitelik setleri kullanılarak elektronik devreler sınıflandırılmaktadır.

2.4 Benzetim Sonuçları ve Performans Analizi

Bu bölümde, elektronik devrelerin sınıflandırılmasına ait benzetim sonuçları ve performans analizi sunulmaktadır. Benzetim sonuçları, istatistiksel ve Fourier öznitelikleri için iki farklı alt bölümde analiz edilmektedir. Her iki bölümde de elektronik devrelerin sınıflandırılmasında kNN (k-En Yakın Komşu) algoritması kullanılmıştır. kNN [61], sınıflandırma işlemlerinde kolay uygulanan ve yaygın olarak

kullanılan bir yöntemdir. kNN sınıflandırıcısı, test ve eğitim verileri arasındaki Öklid uzaklıklarını hesaplayarak, en yakın k komşuyu bulmaktadır. Elde edilen en kısa Öklid mesafelerine göre test verileri, üç tip devreden birine atanmaktadır.

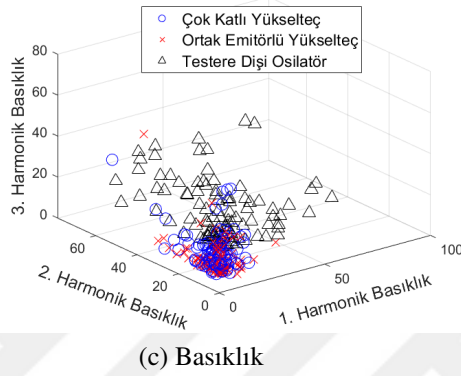
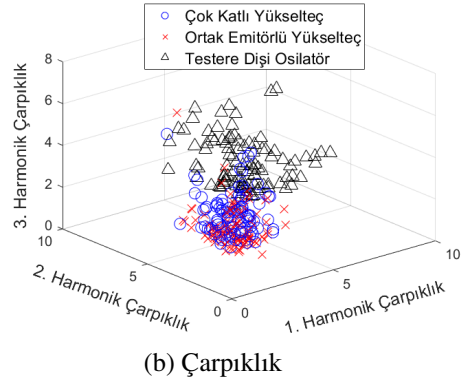
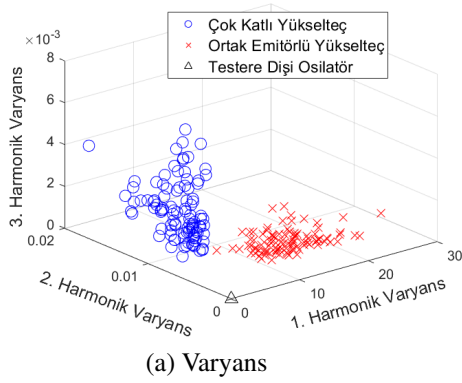
Harmonik radarda, temel frekanstan ziyade harmonik frekanslarla ilgilenilerek hedef dışı yansımalar yüksek oranda bastırıldığından, doğrusal radarda gözlenen daha yoğun bir gürültü etkisinden çok, sadece bir termal gürültü etkisi gözlemlenmektedir. Dolayısıyla, sunulan yöntemin etkinliğinin analiz edilmesi için benzetimler ile toplanan sinyallere Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü (CWGN) eklenmiştir.

Önerilen yöntemin performans analizi, hem istatistiksel hem de Fourier öznitelik setlerine ait alt bölümlerde, saçılma diyagramları (scatter plots), karışıklık matrisleri (confusion matrices) ve değişen SNR değerlerindeki sınıflandırma performans grafikleri ile sunulmaktadır. Monte Carlo benzetimleri kullanılarak performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Bu bölümde, sınıflandırma performans analizinde, öznitelikler ve harmonikler bir bütün olarak değil, her birinin etkisinin anlaşılabilmesi için ayrı ayrı incelenmiştir.

2.4.1 İstatistiksel öznitelik sonuçları

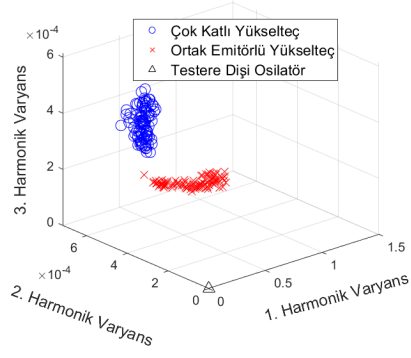
Burada, Bölüm 2.2.1'de açıklanan istatistiksel özniteliklerden faydalanarak elde edilen sonuçlar analiz edilmektedir. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'teki toplanan güç eğrilerinden elde edilen varyans, çarpıklık ve basıklık değerleri bir üç boyutlu harmonik uzayda gösterilmiştir. Harmonik uzay, Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'da gösterildiği gibi birinci, ikinci ve üçüncü harmonik değerlerle tanımlanan üç boyutlu bir uzaydır. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9'daki saçılma diyagramları, elektronik devrelerin sırasıyla SNR=2 dB ve SNR=14 dB gürültü seviyelerindeki birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinin varyans, çarpıklık ve basıklık değerlerini sunmaktadır. SNR değerinin artması nedeniyle Şekil 2.9'daki veri noktalarının, Şekil 2.8'dekilere göre daha iyi kümelendiği fark edilmektedir.

Üç boyutlu harmonik uzayda gösterilen, elektronik devreleri sınıflandırmak için

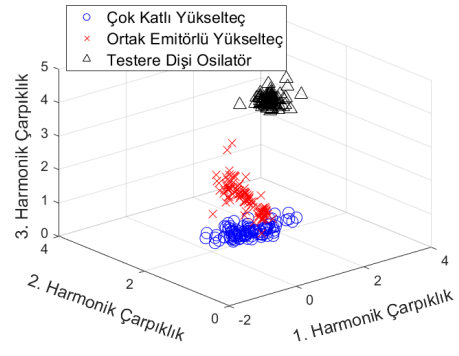


Şekil 2.8: SNR = 2 dB için üç boyutlu harmonik uzaydaki istatistiksel özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Varyans, (b) Çarpıklık, (c) Basıklık.

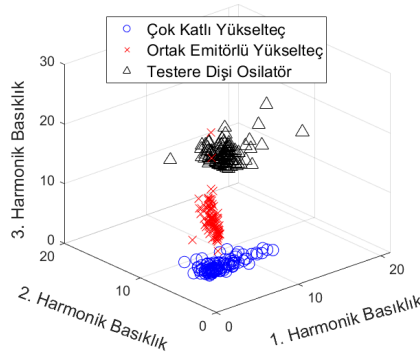
3-en yakın komşu sınıflandırıcısı kullanılmıştır. SNR=8 dB'e ait gürültü seviyesi için elde edilen sınıflandırma sonuçları, karışık matrisi olarak Çizelge 2.1'de gösterilmektedir. Ayrıca farklı SNR değerlerine ait ilk üç harmonikte elde edilen sinyal güç eğrilerinin varyans, çarpıklık ve basıklık özniteliklerine ait 3-en yakın komşu sınıflandırmasının performans sonuçları ise Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Çizelge 2.1 ve Şekil 2.10'daki sınıflandırma performansı yüzdeleri, her devre tipindeki gerçek pozitiflerin sayısının toplam devre sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Harmoniklerdeki güç değerlerinin varyansı, Şekil 2.10'da görüldüğü gibi diğer özniteliklerden daha yüksek sınıflandırma performansına sahiptir. Çarpıklık ve basıklık verilerine ait sınıflandırma performansları da beklenildiği gibi SNR seviyeleri ile artmaktadır. Çarpıklık verilerinin sınıflandırma performansı, düşük SNR seviyelerinde, basıklık verilerinden daha iyi olduğu görülmektedir. Fakat yüksek SNR seviyelerinde, basıklık verilerinin sınıflandırma performansı, çarpıklık verilerinden daha yüksektir.



(a) Varyans



(b) Çarpıklık

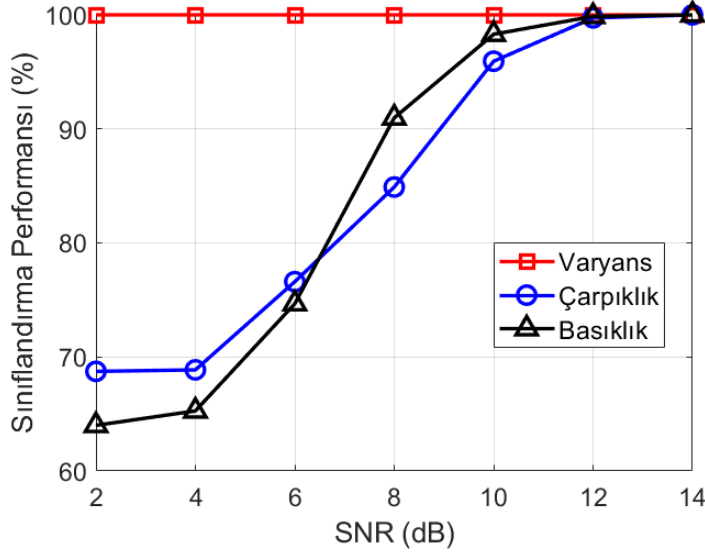


(c) Basıklık

Şekil 2.9: SNR = 14 dB için üç boyutlu harmonik uzaydaki istatistiksel özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Varyans, (b) Çarpıklık, (c) Basıklık.

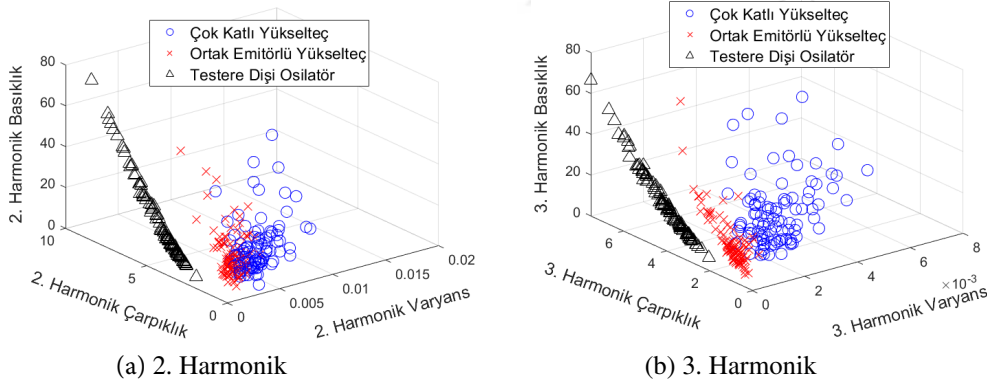
Çizelge 2.1: SNR=8 dB’de birinci, ikinci ve üçüncü harmonik uzayda temsil edilen istatistiksel özniteliklere ait karışıklık matrisleri.

SNR = 8 dB				
Varyans		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%100	%0	%0
	Devre Tipi 2	%0	%100	%0
	Devre Tipi 3	%0	%0	%100
Çarpıklık		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%74	%25.8	%0.2
	Devre Tipi 2	%19.1	%80.7	%0.2
	Devre Tipi 3	%0	%0	%100
Basıklık		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%88.7	%9.8	%1.5
	Devre Tipi 2	%13.8	%84.3	%1.9
	Devre Tipi 3	%0.1	%0	%99.9



Şekil 2.10: Farklı SNR değerleri için istatistiksel özniteliklerin sınıflandırma performansı.

Başka bir gösterimde, yani ikinci ve üçüncü harmoniklerin üç boyutlu varyans, çarpıklık ve basıklık öznitelik uzayındaki ifadesi, Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Şekil 2.11'de, aynı tipteki devrelerin başarılı bir şekilde kümeleniği görülmektedir.



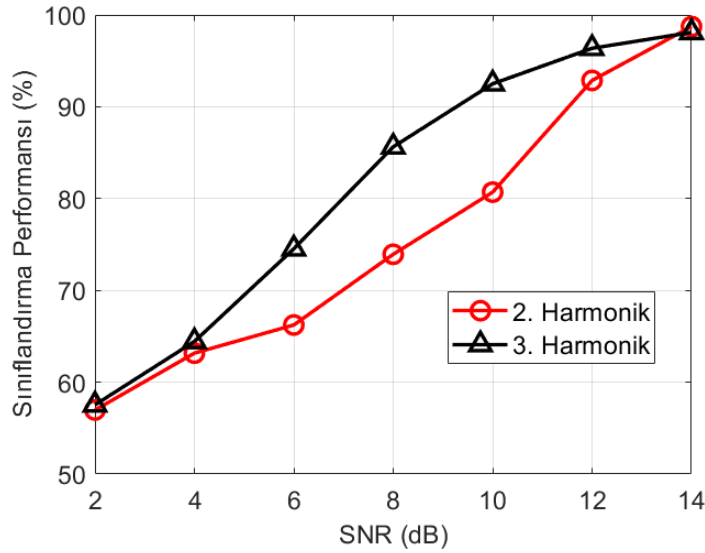
Şekil 2.11: SNR = 2 dB için harmoniklere ait istatistiksel uzay gösterimi, (a) 2. Harmonik, (b) 3. Harmonik.

Çizelge 2.2 ve Şekil 2.12'de, üç boyutlu istatistiksel öznitelik uzayında gösterilen elektronik devrelerin, 3-en yakın komşu algoritması kullanılarak, ikinci ve üçüncü harmonikler için performans değerlendirmesi verilmektedir. Çizelge 2.2, SNR=8 dB gürültü seviyesine ait ikinci ve üçüncü harmoniklerin karışıklık matrisi sonuçlarını göstermektedir. Çizelge 2.2'deki sonuçlara göre SNR=8 dB'de üçüncü harmonik

verilerinin ikinci harmoniğe göre daha başarılı bir sınıflandırma performansına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.12, ikinci ve üçüncü harmoniğin, değişen SNR seviyelerindeki sınıflandırma performansını vermektedir. Şekil 2.12'ye göre üçüncü harmoniğin sınıflandırma performansı ikinci harmoniğe göre daha başarılıdır. Ayrıca, harmonikler için sınıflandırma performansı artan SNR seviyeleri ile artmaktadır. İkinci ve üçüncü harmoniğe ait sınıflandırma performansı, yüksek SNR seviyelerinde, örneğin 12 dB'nin üzerinde %95'in üzerine çıkmıştır.

Çizelge 2.2: SNR=8 dB için üç boyutlu istatistiksel öznitelik uzayında ikinci ve üçüncü harmoniğe ait karışıklık matrisleri.

SNR = 8 dB				
2. Harmonik		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%54.8	%40.2	%5
	Devre Tipi 2	%31.3	%67.8	%0.9
	Devre Tipi 3	%0.5	%0.3	%99.2
3. Harmonik		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%83.3	%15.5	%1.2
	Devre Tipi 2	%14.6	%77.2	%8.2
	Devre Tipi 3	%0.7	%2.9	%96.4



Şekil 2.12: İstatistiksel öznitelik uzayında temsil edilen harmoniklerin değişen SNR değerlerindeki sınıflandırma performansı.

Ayrıca, düşük ve yüksek SNR değerlerinde, Şekil 2.10'da gösterilen harmonik uzaydaki sınıflandırma performanslarının, Şekil 2.12'deki istatistiksel uzaydaki performanslardan daha başarılı olduğu elde edilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmada,

FSHR yaklaşımı kullanıldığında, üç boyutlu harmonik uzaydaki istatistiksel özniteliklerin, her bir harmoniğe kıyasla daha yüksek sınıflandırma performansına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Böylece, üç boyutlu harmonik uzayda istatistiksel öznitelikler, FSHR yaklaşımı kullanıldığında her bir harmoniğin tek başına incelenmesine kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

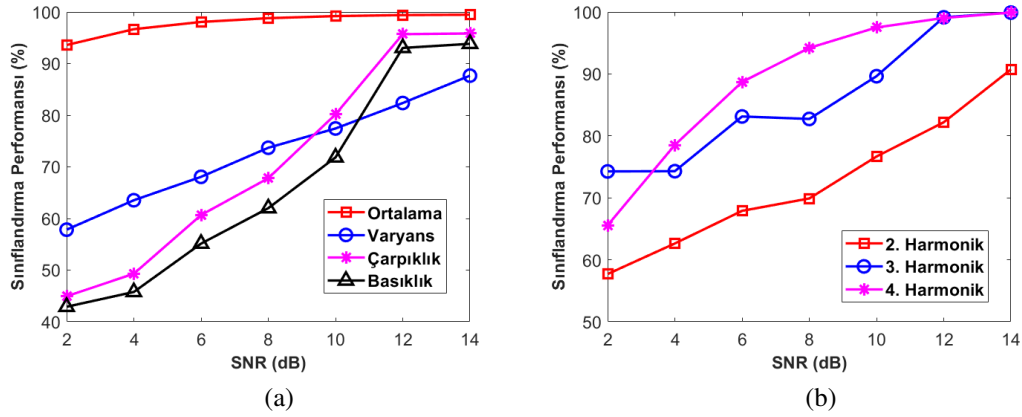
Ayrıca, bu çalışmada sunulan yöntemin sınıflandırma performansı, literatürde bulunan ve elektronik cihazların sınıflandırılmasına ait diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmaların ilkinde, on altı alıcı anten kullanılarak cihazlardan geri-ışık sınıflandırma çalışmaları [12], cihazların sınıflandırılmasına ait sonuçlar Çizelge 2.3'te verilmektedir. Çizelge 2.3'te, toplanan sinyal güç değerlerinin ortalama, standart sapma, maksimum ve minimum değerleri kullanılarak, elektronik cihazların sınıflandırılmasında kNN algoritması tercih edilmiştir.

Çizelge 2.3: Gallagher tarafından sunulan çalışmadaki beş elektronik cihaza ait sınıflandırma performansları [12].

Cihaz	1	2	3	4	5
Ortalama	%100	%99.4	%88.7	%99	%89.6
Standart Sapma	%0	%1.1	%4.6	%1.4	%4.8
Minimum	%100	%95.2	%73.8	%92.9	%71.4
Maksimum	%100	%100	%100	%100	%100

Bir başka çalışmada, elektronik devrelere tek-tonlu değişen güçte sinyaller gönderilmiş ve çarpıklık ve basıklık gibi yüksek dereceli istatistiksel öznitelikler kullanılarak devreler sınıflandırılmıştır [43]. Burada, [12]'deki gibi birçok alıcı anten kullanılarak uzamsal çeşitlilik sağlayan çalışmanın aksine, gücü değişen sinyaller hedeflere iletilerek güç çeşitliliğinden faydalanılmıştır. [43] çalışmasına ait, üç farklı devre tipinin sınıflandırma performansları Şekil 2.13'te gösterilmektedir.

Bu çalışmada, [12] ve [43]'den farklı olarak, yani uzamsal ve güç çeşitliliğinin yerine, frekans süpürmeli sinyaller kullanılarak frekans çeşitliliğinden faydalanılmıştır. Şekil 2.10'da sunulan üç boyutlu uzaydaki varyans, çarpıklık ve basıklık istatistiksel özniteliklerin sınıflandırma performansının, [43]'e ait Şekil 2.13a'da sunulan sonuçlara göre özellikle düşük SNR seviyelerindeki sınıflandırma performansından daha yüksek çıktığı görülmektedir.

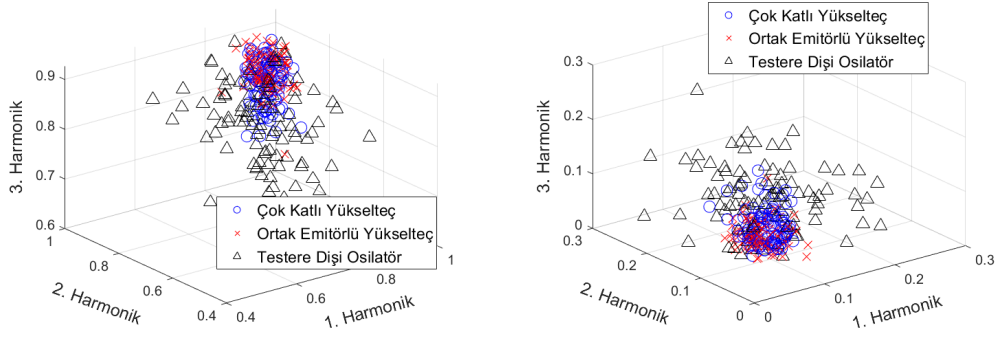


Şekil 2.13: Hayvacı ve diğ. tarafından sunulan çalışmanın sınıflandırma performansı sonuçları [43], (a) İstatistiksel öznitelikler, (b) Harmonikler.

2.4.2 Fourier öznitelik sonuçları

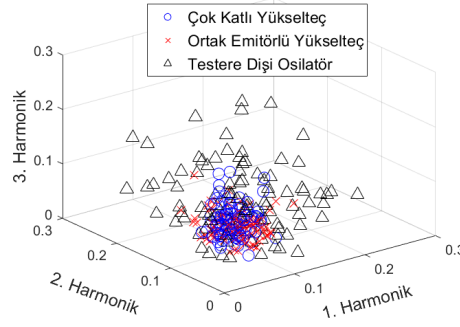
Burada, Bölüm 2.2.2'deki Fourier öznitelikleri kullanılarak elde edilen sınıflandırma performansı sonuçları sunulmaktadır. Fourier dönüşümünün toplam enerjisinin düşük, orta ve yüksek frekans seviyelerindeki enerji değerleri, farklı tipteki elektronik devreler için karakteristik harmonik cevaplar sunmaktadır. Burada, harmoniklerdeki güçlerin Fourier dönüşümleri, eşit büyüklüklerde düşük, orta ve yüksek frekans seviyeleri şeklinde üç alt banda bölünmüştür. Her bir alt bantta elde edilen Fourier öznitelikler, Fourier dönüşümünün toplam enerjisinin ne kadarının düşük, orta ve yüksek frekans seviyelerinde olduğunu göstermektedir. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15, sırasıyla 2 dB ve 14 dB SNR değerlerindeki üç boyutlu harmonik uzayda temsil edilen üç farklı frekans seviyelerine ait saçılma diyagramlarını sunmaktadır.

Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'de gösterilen üç boyutlu harmonik uzaydaki Fourier öznitelikler kullanılarak SNR=8 dB için, 3-en yakın komşu sınıflandırıcısı ile elde edilen performans sonuçları Çizelge 2.4'te verilmektedir. Çizelge 2.4'teki sonuçlara göre SNR=8 dB için birinci, ikinci ve üçüncü harmonik uzayda düşük, orta ve yüksek frekans seviyelerindeki Fourier özniteliklerin benzer sınıflandırma performansına sahip olduğu görülmüş, fakat düşük ve orta frekansların performanslarının ise yüksek frekansa göre biraz daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.



(a) Düşük frekans

(b) Orta frekans

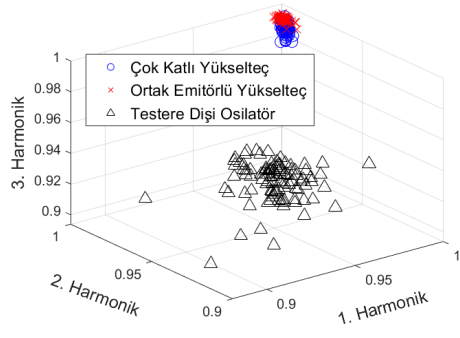


(c) Yüksek frekans

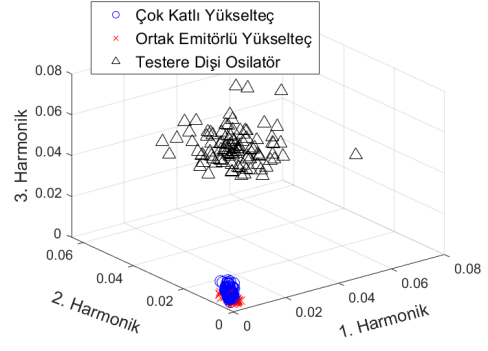
Şekil 2.14: SNR=2 dB için üç boyutlu harmonik uzayda temsil edilen Fourier özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Düşük frekans, (b) Orta frekans, (c) Yüksek frekans.

Çizelge 2.4: SNR=8 dB için birinci, ikinci ve üçüncü harmonik uzayda, Fourier öznitelikler için karışıklık matrisleri.

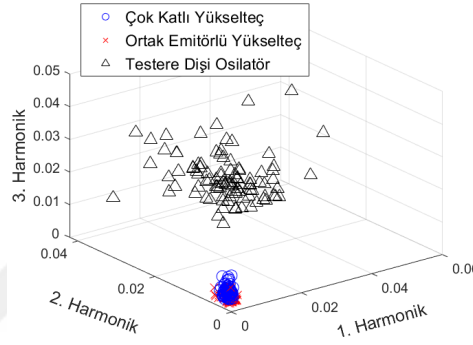
SNR = 8 dB				
Düşük Frekans		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%63.6	%36.2	%0.2
	Devre Tipi 2	%40.5	%59.3	%0.2
	Devre Tipi 3	%1	%0.2	%98.8
Orta Frekans		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%63.4	%36.3	%0.3
	Devre Tipi 2	%39	%60.3	%0.7
	Devre Tipi 3	%1.1	%0.4	%98.5
Yüksek Frekans		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%60.1	%36.9	%3
	Devre Tipi 2	%44.5	%52.4	%3.1
	Devre Tipi 3	%9.3	%5.8	%84.9



(a) Düşük frekans



(b) Orta frekans



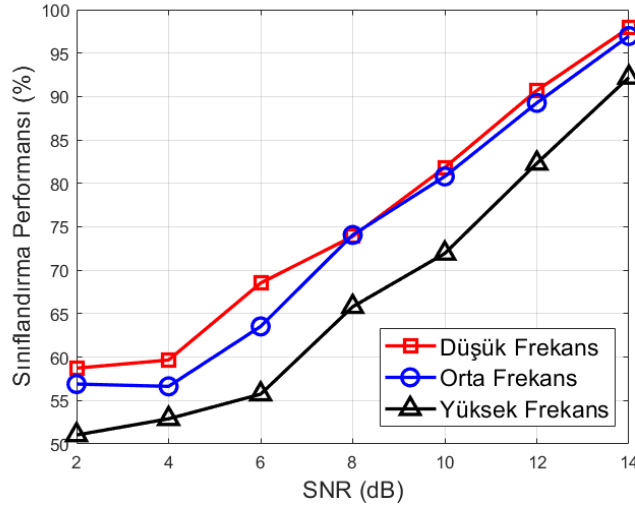
(c) Yüksek frekans

Şekil 2.15: SNR=14 dB için üç boyutlu harmonik uzayda temsil edilen Fourier özniteliklere ait saçılma diyagramları, (a) Düşük frekans, (b) Orta frekans, (c) Yüksek frekans.

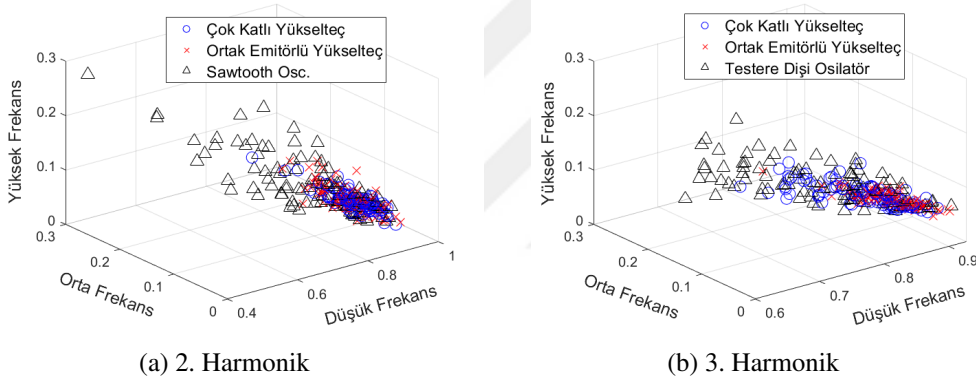
Fourier öznitelikleri kullanılarak farklı SNR seviyelerinde elde edilen sınıflandırma performansı sonuçları Şekil 2.16’da verilmektedir. Burada, yüksek SNR seviyelerinde, düşük ve orta frekans seviyelerinin benzer sınıflandırma performansı gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 2.16’da, birinci, ikinci ve üçüncü harmonik uzayda temsil edilen düşük frekans verilerinin performansı, diğer frekans değerlerine göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Bir başka gösterimde, her bir harmonik, üç boyutlu Fourier öznitelik uzayında temsil edilmiştir. SNR=2 dB ve SNR=14 dB seviyelerinde toplanan harmonik güç eğrilerinin üç boyutlu Fourier uzayındaki gösterimi, Şekil 2.17 ve Şekil 2.18’de verilmiştir. SNR değeri arttıkça aynı tipteki devrelerin daha iyi kümelenildiği görülmüştür.

Fourier öznitelik uzayı gösterimiyle elektronik devrelerin sınıflandırma performansları, SNR=8 dB’de bir karışıklık matrisi şeklinde Çizelge 2.5’te gösterilmiştir. Şekil 2.19’da



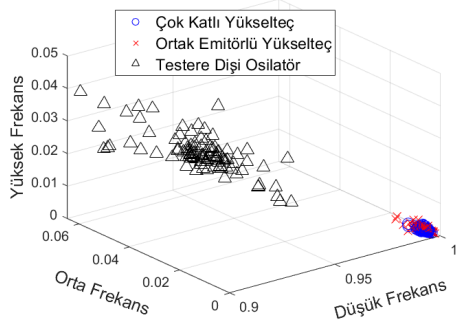
Şekil 2.16: Farklı SNR değerleri için Fourier özniteliklerin sınıflandırma performansı.



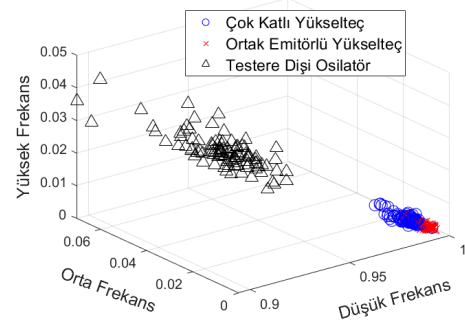
Şekil 2.17: SNR=2 dB için ikinci ve üçüncü harmoniklerin Fourier öznitelik uzayındaki saçılma diyagramları, (a) 2. Harmonik, (b) 3. Harmonik.

ise farklı SNR seviyelerine ait sınıflandırma performansları sunulmuştur. Şekil 2.19’da, üçüncü harmoniğin sınıflandırma performansının, ikinci harmoniğin performansına göre daha başarılı çıktığı görülmüştür. Üçüncü harmoniğe ait performans, yüksek SNR değerlerinde %100’e yaklaşmış, ikinci harmoniğe ait performans ise %70’e ulaşmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlarda üçüncü harmoniğe ait sınıflandırma performanslarının ikinci harmoniğe göre daha yüksek çıktığı görülmüştür. Ancak harmonik radarda gözlenen dezavantajlardan birisi, üçüncü harmonikteki SNR değerinin, ikinci harmonikten düşük olabilmesidir. Bu sorunu çözebilmek için ise yüksek hassasiyete



(a) 2. Harmonik



(b) 3. Harmonik

Şekil 2.18: SNR=14 dB için ikinci ve üçüncü harmoniklerin Fourier öznitelik uzayındaki saçılma diyagramları, (a) 2. Harmonik, (b) 3. Harmonik.

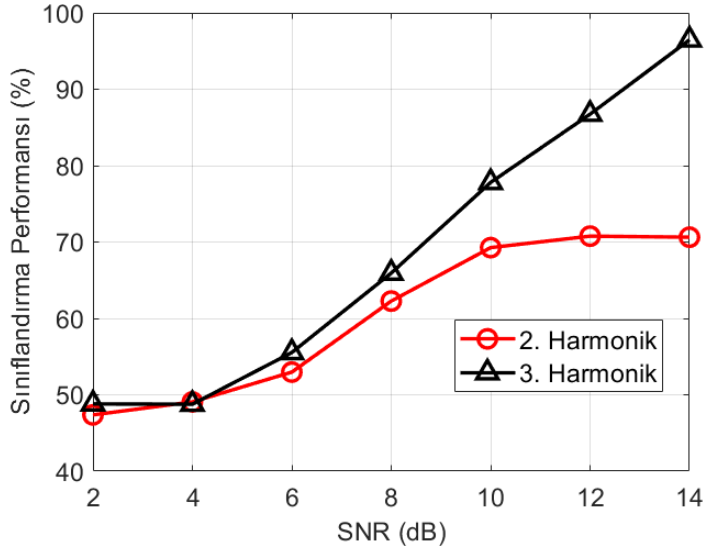
Çizelge 2.5: SNR=8 dB için üç boyutlu Fourier öznitelik uzayında ikinci ve üçüncü harmoniğe ait karışıklık matrisleri.

SNR = 8 dB				
2. Harmonik		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%50.8	%47.3	%1.9
	Devre Tipi 2	%47.5	%47.8	%4.7
	Devre Tipi 3	%4.7	%7.1	%88.2
3. Harmonik		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%48.5	%39.9	%11.6
	Devre Tipi 2	%36.3	%61.4	%2.3
	Devre Tipi 3	%9.4	%2.7	%87.9

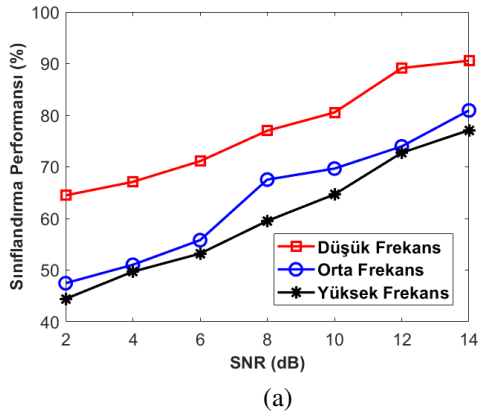
sahip alıcılar kullanılabilir.

Harmonik güç eğrilerinin frekans uzayında incelenmesi [43] çalışmasında da kullanılmıştır. [43]'deki Fourier özniteliklerin sınıflandırma performansı Şekil 2.20'de sunulmaktadır. Şekil 2.20 ve Şekil 2.16 kıyaslandığında, SNR=2 dB'de, orta ve yüksek frekanstaki Fourier özniteliklere ait sınıflandırma performansında Şekil 2.16'da sunulduğu gibi iyileşme görülmüştür.

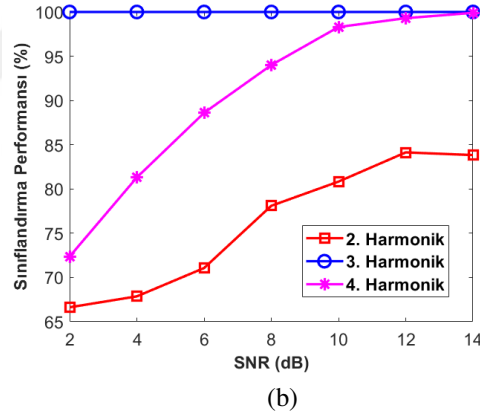
Çizelge 2.6, harmonik ve öznitelik uzaylarına ait SNR=8 dB durumu için sınıflandırma yüzdelerini özetlemektedir. Çizelge 2.6'ya göre, SNR=8 dB'de, istatistiksel öznitelikler, elektronik devrelerin sınıflandırılmasında Fourier özniteliklere göre daha başarılıdır. Ek olarak, SNR=8 dB için, üçüncü harmonik, hem istatistiksel hem de Fourier öznitelik uzaylarında ikinci harmoniğe göre daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 2.19: Fourier öznitelik uzayında temsil edilen harmoniklerin farklı SNR değerlerindeki sınıflandırma performansı.



(a)



(b)

Şekil 2.20: Hayvacı ve diğ. tarafından sunulan çalışmanın sınıflandırma performansı sonuçları [43], (a) Fourier öznitelikler, (b) Harmonikler.

Gerçek hayatta, harmonik sinyaller sadece doğrusal olmayan nesnelere değil, aynı zamanda alıcı ve vericideki bileşenlerden de kaynaklanabilir. Güvenilir ve başarılı bir sınıflandırma için sadece elektronik devrelerden geri-ışık harmonik sinyalleri elde etmek çok önemlidir. Bu yüzden, deneysel bir çalışmada, verici tarafta alçak geçiren süzgeçler ve alıcı tarafta ise yüksek geçiren süzgeçler kullanılmalıdır [12, 13, 15, 41].

Çizelge 2.6: SNR=8 dB için sınıflandırma performansı karşılaştırma tablosu.

SNR=8 dB		
	Harmonik Uzayı	
Varyans	%100	
Çarpıklık	%84.90	
Basıklık	%90.97	
Düşük Frekans	%73.90	
Orta Frekans	%74.07	
Yüksek Frekans	%65.80	
	İstatistiksel Öznitelik Uzayı	Fourier Öznitelik Uzayı
2. Harmonik	%73.93	%62.27
3. Harmonik	%85.63	%65.93

2.5 Sonuçlar

Bu bölümde, doğrusal olmayan yapıdaki elektronik devreleri sınıflandıran yeni bir yöntem önerilmiştir. Ortak emitörlü yükselteçler, çok katlı yükselteçler ve testere dişi osilatörler gibi çeşitli elektronik devre türleri, Frekans Süpürmeli Harmonik Radar (FSHR) yaklaşımı kullanılarak sınıflandırılmıştır. Daha önceki çalışmalardan farklı olarak, sabit güce sahip sinyaller, frekansları geniş bir aralıkta süpürülerek sırasıyla elektronik devrelere gönderilmiştir. Devrelerden geri-ışık sinyallerin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde elde edilen güç değerleri kullanılarak istatistiksel ve Fourier öznitelikler çıkarılmıştır. Bu öznitelikler kullanılarak k-en yakın komşu algoritması kullanılarak çeşitli elektronik devreler sınıflandırılmıştır. Saçılma diyagramları, farklı SNR seviyeleri için hem öznitelik hem de harmonik uzaylarında ifade edilmiştir. Elektronik devrelerin birinci, ikinci ve üçüncü harmonik frekanslardaki güç değerlerinin varyansı, çarpıklığı ve basıklığı elde edilmiştir. Bu istatistiksel öznitelikler, her bir elektronik devre tipinin kendine has doğrusal olmayan özelliklerini sunması açısından önemlidir. Ayrıca devrelerin harmonik yanıtlarının frekans içeriği bilgisi, Fourier öznitelikleri ile elde edilmiştir. Fourier dönüşümünün farklı frekans seviyelerindeki enerji değerleri hesaplanmıştır. Toplam enerjinin ne kadarının ilgili frekans seviyesinde olduğunu belirten Fourier öznitelikleri, her devre tipi için ayırt edici sonuçlar sunmuştur.

Sunulan yöntemin etkinliğinin analizi için devrelerden geri-ışığıyan harmonik cevaplara Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü (CWGN) uygulanmıştır. İstatiksel ve Fourier özniteliklere ait sınıflandırma performansları hem karışıklık matrisleri hem de farklı SNR değerlerine ait başarılı sınıflandırma yüzdeleri ile ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, frekans süpürmeli sinyallerin hedeflere iletilmesi, elektronik devrelerin başarılı bir şekilde sınıflandırılmasını sağlamıştır. Ayrıca, harmonik radar kullanılarak, doğrusal olmayan test hedeflerinin sınıflandırılması konusunda literatürde bulunan diğer çalışmalardaki yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırma da sunulmuştur.

Gelecek çalışmalarda, farklı tipte dalga formlarının elektronik devrelere iletilmesiyle harmonik yanıtların analizi planlanmaktadır. Gelecekte yapılması planan çalışmalardan bir diğeri ise, bu bölümde sunulan yaklaşıma ait sonuçların, deneysel bir düzenek kullanılarak gerçek harmonik veriler ile test edilip doğrulanmasıdır. Bu bölümde sunulan çalışma, farklı öznitelikler ve sınıflandırma yöntemleriyle elektronik devrelerin sınıflandırma performansını analiz edecek diğer çalışmalar için umut verici bir referans olabilir.

3. ELEKTRONİK DEVRELERİ HARMONİK RADAR İLE SINIFLANDIRAN ÖZİNİTELİK KÜMELERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

3.1 Giriş

Harmonik radar, insan yapımı hedeflerin tespiti, takibi ve sınıflandırılmasında giderek daha popüler hale gelmektedir. Elektronik cihazlar ve metal-metal yapıdaki nesnelere, doğrusal olmayan davranışlar sergilediğinden, neredeyse insan yapımı hedeflerin tümü harmonik tepkiler vermektedir. Elektronik devre elemanlarından yarı-iletkenler, diyotlar, transistörler, karıştırıcılar, vb. doğrusal olmayan akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinden dolayı kendilerine gelen dalganın harmoniklerinde sinyal yaymaktadırlar [7, 40].

Elektronik cihazların harmonik radar ile sınıflandırılmasına ait literatürdeki çalışmaların ilkinde elektronik cihazlar, önceden belirlenen konumlarda ve yönlerde yer değiştirilmiş ve on altı alıcı anten tarafından hedeflerden geri-ışık sinyaller, deney ortamında toplanmıştır [12]. Harmonik tepkiler, belirli öznelik vektörleri ile ifade edilerek beş farklı cihazlar sınıflandırılmıştır. Farklı bir çalışmada ise hedeflere bir güç süpürmeli sinyal iletilmiş ve devreleri ayırt etmek için harmoniklerde alınan güçlerin istatistiksel [8] ve Fourier öznelikleri [9] kullanılmıştır. Daha sonra gürültülü bir ortamda çeşitli elektronik devreler, istatistiksel ve Fourier öznelikleri kullanılarak sınıflandırılmıştır [43]. Bir başka çalışmada ise, hedeflere tek-tonlu sinyal gönderilerek, geliştirilen doğrusal bir model ile birden fazla elektronik devre türü ayırt edilmiştir [42].

Bu bölümde, frekans süpürmeli bir sinyal hedeflere gönderilecek ve hedeflerden geri-ışık sinyallerin güç değerleri analiz edilerek çok katlı yükselteçler, ortak emitörlü yükselteçler ve testere dişi osilatör devreleri sınıflandırılacaktır. Frekans süpürmeli harmonik radar yaklaşımının kullanıldığı Bölüm 2’de, harmoniklerin ve özneliklerin sınıflandırma performansları ayrı ayrı analiz edilmiştir.

Önceki çalışmanın devamı olarak, bu bölümde ise performans karşılaştırmalarında kapsamlı bir anlayışa sahip olmak için oluşturulan öznitelik kümeleri ile daha fazla parametreden yararlanılacaktır. Yeni öznitelik kümelerine ait sınıflandırma performans değerlendirmeleri, Monte Carlo benzetimleri ile yapılacaktır. Oluşturulan yeni öznitelik kümelerine ait sınıflandırma performansı sonuçları, Bölüm 2'deki sonuçlara göre önemli bir iyileştirme sağlayacaktır.

3.2 Elektronik Devrelerden Harmonik Geri-Işıma

Doğrusal olmayan bir hedeften geri-ışık bir sinyal Taylor serisi ile modellenmektedir:

$$s_{out}(t) = \sum_{p=1}^{\infty} a_p s_{in}^p(t) \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de s_{in} , hedefe gelen sinyali, s_{out} , hedeften geri-ışık sinyali ve a_p 'lerde kompleks güç serisi katsayılarını ifade etmektedir. a_1 doğrusal cevabı temsil ederken, $\{a_2, a_3, \dots\}$ 'ler ise doğrusal olmayan katsayılardır.

Bu bölümde, frekans taramalı bir sinyal, frekansları sırayla olacak şekilde, yani her seferde tek bir frekans şeklinde hedeflere iletilmektedir. Yeniden ışık sinyallerin birinci, ikinci ve üçüncü harmonik frekanslardaki güç değerlerinden oluşturulan öznitelik kümeleri, elektronik cihazları sınıflandırmak için kullanılmaktadır.

3.3 Hedefleri Sınıflandıran Öznitelik Kümeleri

Her bir elektronik devreye frekans süpürmeli ve sabit güçteki bir sinyal iletilmekte ve elektronik devrelerden alınan sinyallerin birinci, ikinci ve üçüncü harmonik frekanslarındaki güç değerleri toplanarak devreler sınıflandırılmaktadır. Sınıflandırmada kullanılacak öznitelik kümeleri: istatistiksel ve Fourier öznitelik kümeleri şeklinde iki alt bölümde anlatılmaktadır.

3.3.1 İstatiksel öznitelik kümesi

Bu bölümde, harmonik güç eğrilerinden istatiksel öznitelik kümesinin nasıl oluşturulduğu açıklanmaktadır. İstatiksel öznitelik kümesinde kullanılan istatiksel parametreler: birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerde alınan güç eğrilerinin varyans, çarpıklık ve basıklık değerleridir. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te verilen birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerdeki alınan güç eğrilerinin her biri, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_F]$ şeklinde bir veri vektörüyle ifade edilir. Bu ifadede, x_F önceden belirlenen iletilen frekans aralığının son değerinde alınan gücü ifade etmektedir. x_1 , elektronik devrelere iletilen birinci frekansta alınan güç değeri, x_2 , iletilen ikinci frekansta alınan güç değeri, vb. olmaktadır.

Veri vektörü, \mathbf{x} 'in varyans, çarpıklık ve basıklık değeri aşağıda ifade edilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır [56]:

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \frac{1}{F-1} \sum_{i=1}^F (x_i - \mu)^2 \\ S &= \frac{1}{F} \frac{\sum_{i=1}^F (x_i - \mu)^3}{\sigma^3} \\ K &= \frac{1}{F} \frac{\sum_{i=1}^F (x_i - \mu)^4}{\sigma^4}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Bu eşitliklerde, \mathbf{x} 'in ortalaması μ , standard sapması ise σ ile gösterilmektedir.

Elektronik devreleri sınıflandırmada kullanılacak istatiksel öznitelik kümesi, varyans, çarpıklık ve basıklık ile birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerin kombinasyonundan oluşmaktadır. Dolayısıyla, istatiksel öznitelik kümesi, her bir elektronik devre için dokuz örnekten oluşmaktadır. Farklı elektronik devre türleri, kendilerine özgü karakteristik harmonik cevaplara ve istatiksel parametrelere sahiptir. Bu nedenle, istatiksel öznitelik kümesi, her bir devre türü için ayırt edici sonuçlar sağlamaktadır.

3.3.2 Fourier öznitelik kümesi

Bölüm 3.3.1’de, sunulan istatistiksel öznitelik kümesi, birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerde elde edilen güç dağılımlarının şeklini tanımlamaktadır. Fakat istatistiksel öznitelik kümesi, dağılımların frekans içeriği bilgisini kaybetmektedir. Devrelerden geri-ışığıyan sinyallerin harmoniklerinde elde edilen güçlerin frekans içeriği de elektronik devreleri sınıflandırmada ayırt edici olmaktadır. Burada, devrelerden toplanan güç eğrilerinin yani \mathbf{x} veri vektörünün, iletilen frekanslara göre zamanda ölçüldüğü kabul edilmektedir. Veri vektörünün Ayırık Fourier Dönüşü (DFT), Eşitlik (3.3)’deki gibi ifade edilmektedir:

$$\mathbf{X}(k) = \sum_{n=1}^F \mathbf{x}_n e^{-j2\pi(k-1)(n-1)/F} \quad (3.3)$$

Eşitlik (3.3)’de, $k = 1, \dots, F$ ve F ise iletilen frekans aralığının uzunluğunu temsil etmektedir. Birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerde elde edilen güç eğrilerinin DFT’leri düşük, orta ve yüksek frekans seviyelerine ayrılarak bu frekans seviyelerindeki enerji değerleri hesaplanmaktadır. Üç farklı frekans seviyelerindeki enerji değerleri, çeşitli elektronik devreler için karakteristik özellikler sunmaktadır.

Birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerdeki düşük, orta ve yüksek frekans seviyelerindeki enerji değerlerinin kombinasyonu ile Fourier öznitelik kümesi oluşturulmaktadır. Yani, Fourier öznitelik kümesinde her bir elektronik devre için dokuz örnek bulunmaktadır. Fourier öznitelik kümesi ile birbirinden farklı devreler sınıflandırılabilir.

3.4 Deneysel Tasarım, Veri Toplama ve Benzetimler

Sınıflandırmada kullanılacak elektronik devre türleri, çok katlı yükselteç, ortak emitörlü yükselteç ve testere dişi osilatör devreleridir. Bu bölümde sunulan yaklaşım ile herhangi doğrusal olmayan türdeki bir devre tipi ve sayısı belirlenebilir. Frekans süpürmeli iletilen sinyale ait her bir devreden alınan harmonik tepkiler, Cadence AWR Mikrodalga Ofis programındaki Harmonik Denge (Harmonic Balance) simülatörü

yardımıyla toplanmaktadır. Harmonik Denge (Harmonic Balance) simülatörü, doğru simülasyonlar ile devrelerin gerçek harmonik tepkilerini sağlamaktadır.

Elektronik devrelerden rastgele seçilen devre parametrelerinin değerleri değiştirilerek her bir devre türü için 100 farklı devre seti oluşturulmaktadır. Yani toplamda 300 farklı devre, yeni öznitelik kümeleri kullanılarak sınıflandırılmaktadır. Devrelerin her birine frekansları sırayla iletilecek şekilde frekans süpürmeli bir sinyal gönderilmektedir. Frekansı, 1000 MHz'den 10.000 MHz'e kadar 90 MHz'lik adımlarla süpürülen bir sinyal hedeflere gönderilmektedir. Devrelerden alınan birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerdeki güç eğrileri, Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4, gürültüsüz durumda elde edilen çıkış gücü eğrilerini ifade etmektedir. Gerçek hayattaki harmonik sinyaller için, Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü (CWGN), Şekil 2.2, Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'deki sinyallere uygulanmaktadır. Bölüm 3.3'te bahsedilen öznitelik kümeleri kullanılarak elektronik devreler sınıflandırılmaktadır.

3.5 Performans Değerlendirmesi ve Analizi

Bu bölümde, çeşitli elektronik devreler, kNN sınıflandırıcısı ile sınıflandırılmaktadır. kNN sınıflandırıcısı, test verisi ile eğitim verisi örnekleri arasındaki en kısa Öklid mesafesine göre test verisini ilgili devre tipinden birisine gruplandıran ve yaygın olarak tercih edilen bir algoritmadır [61]. Elektronik devreleri sınıflandırmada kullanılan istatistiksel ve Fourier öznitelik kümeleri, harmoniklerde yeniden ışılan sinyallerin güç değerlerinden elde edilmektedir. Bölüm 3.3'te bahsedildiği gibi, her bir öznitelik kümesinde, üç parametrenin ve üç harmoniğin kominasyonu ile dokuz örnek kullanılmaktadır. Dolayısıyla 9-en yakın komşu algoritması kullanılarak farklı elektronik devreler sınıflandırılmaktadır.

Harmonik radar uygulamalarında, temel frekansın harmonikleri kullanıldığından, hedef dışı yansımalar yüksek oranda bastırılmaktadır. Bu yüzden doğrusal olmayan hedeflerden geri-ışılan sinyallerde sadece termal gürültü etkisi gözlemlenmektedir. Bu çalışmada, bu gürültü etkisi, CWGN olarak modellenmektedir. Gürültü varlığındaki

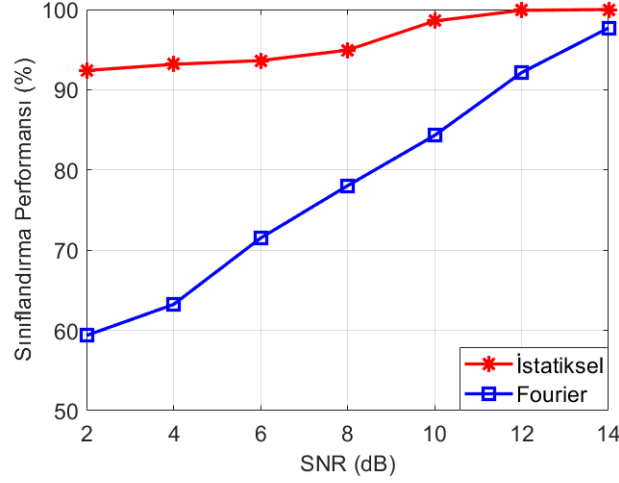
sinyaller kullanılarak Monte Carlo benzetimleri ile istatikselsel ve Fourier öznitelik kümelerinin sınıflandırma performansları analiz edilmektedir.

İstatikselsel ve Fourier öznitelik kümelerine ait sınıflandırma performansı, SNR=8 dB seviyesindeki karışıklık matrisleri ve farklı SNR değerlerindeki sınıflandırma performansları ile sunulmaktadır. Çizelge 3.1, istatikselsel ve Fourier öznitelik kümelerinin SNR=8 dB seviyesindeki karışıklık matrislerini göstermektedir. Çizelge 3.1, istatikselsel öznitelik kümesine ait sınıflandırma performansının Fourier öznitelik kümesinin performansından daha başarılı olduğunu göstermektedir. Şekil 3.1 ise, değişen SNR değerlerindeki istatikselsel ve Fourier öznitelik kümelerinin sınıflandırma performanslarını sunmaktadır. Sınıflandırma performanslarının yüzdesi, her bir devre tipindeki gerçek pozitiflerin sayısının toplam devre sayısına bölünmesiyle elde edilmiştir. Şekil 3.1’te görüldüğü gibi istatikselsel öznitelik kümesinin sınıflandırma performansı, tüm SNR değerlerinde %90’ın üzerindedir. Ayrıca istatikselsel öznitelik kümelerinin sınıflandırma performansı, Fourier öznitelik kümesinden daha başarılı çıkmıştır.

Çizelge 3.1: SNR=8 dB için istatikselsel ve Fourier öznitelik kümelerine ait karışıklık matrisleri.

SNR = 8 dB				
İstatikselsel		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%91.4	%5.6	%3
	Devre Tipi 2	%5.2	%93.5	%1.3
	Devre Tipi 3	%0.1	%0	%99.9
Fourier		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
	Devre Tipi 1	%65.8	%33.9	%0.3
	Devre Tipi 2	%29.5	%70.4	%0.1
	Devre Tipi 3	%1.2	%0.9	%97.9

Özniteliklerin ve harmoniklerin ayrı ayrı analiz edildiği sonuçlar, Bölüm 2’de sunulan, Şekil 2.10, Şekil 2.12, Şekil 2.16 ve Şekil 2.19’da sunulmuştur. Şekil 3.1, istatikselsel ve Fourier öznitelik kümelerine ait sınıflandırma performanslarının, özniteliklerin ve harmoniklerin ayrı ayrı analiz edildiği Bölüm 2’deki sonuçlara göre önemli bir iyileştirme sağlamıştır.



Şekil 3.1: İstatiksel ve Fourier öznitelik kümelerine ait farklı SNR seviyelerindeki sınıflandırma performansları.

3.6 Sonuçlar

Bu bölümde, frekans süpürmeli ve sabit güce sahip bir sinyal, ardışık frekanslar şeklinde elektronik devrelere gönderilmiştir. Hedeflerden geri-yansıyan sinyallerin birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerinde elde edilen güç değerlerinden, istatiksel ve Fourier öznitelik kümeleri elde edilmiştir. Bölüm 2’de, öznitelik parametrelerinin ve harmoniklerin ayrı ayrı sınıflandırma performansları analiz edilmişti. Bunun yerine, bu bölümde, hem harmonik bilgisi hem de öznitelik parametreleri kullanılarak elde edilen öznitelik kümelerinin sınıflandırma performansları incelenmiştir. Elektronik devrelerin sınıflandırılmasında kullanılan öznitelikleri ve harmonikleri teker teker analiz etmek yerine, öznitelik kümeleri kullanmak, performans karşılaştırmaları için iyi bir temel sağlamıştır. Buna ek olarak, elektronik devrelere ait harmonik yanıtlara, Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü eklenmiş ve Monte Carlo benzetimleri ile istatiksel ve Fourier öznitelik kümelerinin sınıflandırma performansları değerlendirilmiştir.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar, deneysel bir kurulumla gerçek verilerin toplanarak, bu bölümde elde edilen sonuçların, test edilip doğrulanmasını içermektedir. Farklı dalga formlarına sahip bir sinyalin hedeflere iletilerek cihazlardan geri-ışkıyan sinyallerin harmonik tepkilerinin analiz edilmesi de yapılması planlanan diğer bir çalışmadır.



4. DOĞRUSAL BİR MODEL KULLANILARAK ELEKTRONİK DEVRELERİN HARMONİK RADAR İLE SINIFLANDIRILMASI

4.1 Giriş

Harmonik radar sistemleri sayesinde doğrusal olmayan bir hedefe sinyaller göndererek, alıcı tarafta sadece temel frekanstaki sinyaller değil, hem temel frekansın harmoniklerinde hem de birden fazla tonda sinyal gönderildiği takdirde, harmoniklerin arakiplenim ürünlerinde sinyaller toplanabilmektedir. Bu bölümde, farklı bir perspektif ile, bilinmeyen deterministik parametre vektörlerinin tahminine dayalı, yeni geliştirilen doğrusal bir model ile tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumları için farklı elektronik devreler sınıflandırılmaktadır. Her bir devre türü için ayrıştırıcı parametre vektörleri elde edilerek geliştirilen doğrusal model sayesinde doğrusal olmayan elektronik devreler sınıflandırılabilir.

Bu bölümde, çeşitli elektronik devreler, geliştirilen doğrusal bir model sayesinde harmonik radar kullanılarak sınıflandırılmaktadır. Tek-tonlu ve iki-tonlu şeklinde iki farklı iletim durumu için devrelerin harmonik yanıtları analiz edilmektedir. Her bir devreye güç sığdırmalı tek-tonlu ve iki-tonlu sinüzoidal sinyaller gönderilmektedir. Doğrusal olmayan devrelerin, birinci, ikinci, üçüncü harmonik ve arakiplenim frekanslarındaki cevapları incelenmektedir. Devrelerin doğrusal olmayan karakteristiklerini temsil eden bilinmeyen parametrelerle ilişkilendiren doğrusal model geliştirilmektedir. Bilinmeyen deterministik parametre vektörleri ve gözlem matrisleri, tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumları için türetilmektedir. Sonrasında, farklı Sinyal Gürültü Oranı (SNR) seviyelerinde Kompleks Beyaz Gauss Gürültüsü (CWGN) eklenerek, Monte Carlo benzetimleri ile parametre vektörleri, En Büyük Olabilirlik Kestirimi (MLE) ile tahmin edilmektedir. Tahmin edilen vektörler, elektronik devreler için ayırt edici özellikler sağlamak ve normalize edilen tahmini vektörlerin ortalama ve varyans istatistiksel özellikleri kullanılarak elektronik devreler sınıflandırılmaktadır.

Bu bölümde, sınıflandırıcı olarak k-en yakın komşu (kNN) algoritması kullanılmaktadır.

4.2 Taylor Serisi Modeli

Bu bölümde, elektronik devrelere tek-tonlu ve iki-tonlu sinyaller gönderilerek, devrelerin harmonik cevapları ile elektronik devrelerin sınıflandırılmasında kullanılacak doğrusal bir model elde edilecektir. Ayrıca En Büyük Olabilirlik Kestiricisi ile bilinmeyen parametreler tahmin edilecektir.

Doğrusal olmayan bir hedef, üzerine gelen dalganın hem temel frekansında hem de temel frekansın tam sayı katlarında yani harmoniklerinde sinyaller üretmektedir. Doğrusal olmayan hedefler tarafından oluşan harmonik cevaplar, Taylor serisi modeli ile temsil edilmektedir [7, 12]:

$$s_{out}[n] = \sum_{n=1}^{\infty} a_n x^n \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)'de hedefe iletilen dalga x , hedeften geri-ışık dalgası s ve güç serisi katsayıları ise a_n 'ler ile ifade edilmektedir.

Bu bölümde, tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumu için doğrusal olmayan elektronik devrelerin harmonik cevapları türetilmektedir.

4.2.1 Tek-tonlu iletim

Tek-tonlu iletim durumunda, Eşitlik (4.2)'teki gibi tek bir frekansa sahip sinüzoidal bir sinyal, elektronik devrelere iletilmektedir:

$$x_1 = x_0 \sin(\omega_0 n + \phi_0), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4.2)$$

Burada x_1 hedefe gönderilen sinyal, x_0 ve ϕ_0 hedefe gönderilen sinyalin genliği ve fazı, ve n ise ω_0 temel frekansın n . harmoniğini ifade eder.

Doğrusal olmayan elektronik devreden geri-ışışyan sinyal, $s_1[n]$, Eşitlik (4.1) ifadesi kullanılarak, birinci, $n = 1$, ikinci, $n = 2$ ve üçüncü derece, $n = 3$, harmonikler için şu şekilde ifade edilmektedir:

$$s_1[n] = b_1 \sin(\omega_0 n) + b_2 \sin(2\omega_0 n) + b_3 \sin(3\omega_0 n) + b_4 \cos(\omega_0 n) + b_5 \cos(2\omega_0 n) + b_6 \cos(3\omega_0 n) \quad (4.3)$$

Eşitlik (4.3)'te faz bilgileri, genlik bilgilerinin içerisine aktarılmıştır. Eşitlik (4.3)'teki b katsayıları aşağıdaki gibi türetilmiştir:

$$\begin{aligned} b_1 &= (a_1 x_0 + \frac{3}{4} a_3 x_0^3) \cos(\phi_1) \\ b_2 &= \frac{1}{2} a_2 x_0^2 \sin(\phi_2) \\ b_3 &= -\frac{1}{4} a_3 x_0^3 \cos(\phi_3) \\ b_4 &= (a_1 x_0 + \frac{3}{4} a_3 x_0^3) \sin(\phi_1) \\ b_5 &= -\frac{1}{2} a_2 x_0^2 \cos(\phi_2) \\ b_6 &= -\frac{1}{4} a_3 x_0^3 \sin(\phi_3) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.3), tek-tonlu bir sinyalin doğrusal olmayan bir hedefe gönderildiğinde, ω_0 , $2\omega_0$ ve $3\omega_0$ frekanslarında hedeften geri-ışışyan sinyali ifade etmektedir. Burada, her harmoniğe ait fazın, $[-\pi, \pi]$ aralığında bir değer alan rastgele bir değişken olduğu varsayılmaktadır.

4.2.2 İki-tonlu iletim

İki-tonlu iletim durumu için Eşitlik (4.5)'teki gibi iki farklı frekans bilgisi içeren sinüzoidal bir sinyal elektronik devrelere gönderilmektedir:

$$x_2 = x_{21} \sin(\omega_1 n + \phi_{21}) + x_{22} \sin(\omega_2 n + \phi_{22}) \quad (4.5)$$

Burada, x_2 hedefe gelen sinyali, x_{21} ve x_{22} genlik değerlerini, ϕ_{21} ve ϕ_{22} başlangıç fazlarını ve n ω_1 ve ω_2 frekanslarının n . harmoniğini belirtmektedir. Doğrusal olmayan

hedeften geri-ışığıyan sinyal, hem ω_1 ve ω_2 frekanslarının tam sayı katlarını hem de ω_1 ve ω_2 frekanslarının arakiplenim ürünlerini içermektedir.

Eşitlik (4.5)'deki iki-tonlu sinüzoidal sinyal, Eşitlik (4.1)'de yerine yazıldığında elde edilen $s_2[n]$ geri-ışığıyan sinyal ifadesi, faz bilgilerinin genlik bilgilerinin içine aktarılarak aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned}
s_2[n] = & c_1 \sin(\omega_1 n) + c_2 \sin(2\omega_1 n) + c_3 \sin(3\omega_1 n) \\
& + c_4 \cos(\omega_1 n) + c_5 \cos(2\omega_1 n) + c_6 \cos(3\omega_1 n) \\
& + c_7 \sin(\omega_2 n) + c_8 \sin(2\omega_2 n) + c_9 \sin(3\omega_2 n) \\
& + c_{10} \cos(\omega_2 n) + c_{11} \cos(2\omega_2 n) + c_{12} \cos(3\omega_2 n) \\
& + c_{13} \cos((\omega_1 + \omega_2)n) + c_{14} \sin((\omega_1 + \omega_2)n) \\
& + c_{15} \cos((\omega_1 - \omega_2)n) + c_{16} \sin((\omega_1 - \omega_2)n) \\
& + c_{17} \cos((\omega_2 - 2\omega_1)n) + c_{18} \sin((\omega_2 - 2\omega_1)n) \\
& + c_{19} \cos((2\omega_1 + \omega_2)n) + c_{20} \sin((2\omega_1 + \omega_2)n) \\
& + c_{21} \cos((\omega_1 - 2\omega_2)n) + c_{22} \sin((\omega_1 - 2\omega_2)n) \\
& + c_{23} \cos((2\omega_2 + \omega_1)n) + c_{24} \sin((2\omega_2 + \omega_1)n)
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Burada, ω_1 ve ω_2 temel frekansların ilk üç harmoniğine ait c katsayıları ise Eşitlik (4.7)'deki şekilde türetilmektedir.

$$\begin{aligned}
c_1 &= (a_1 x_1 + \frac{3a_3}{4} x_1^3 + \frac{3a_3}{2} x_2^2 x_1) \cos(\phi_1), \\
c_2 &= \frac{a_2}{2} x_1^2 \sin(\phi_2), \quad c_3 = -\frac{a_3}{4} x_1^3 \cos(\phi_3), \\
c_4 &= (a_1 x_1 + \frac{3a_3}{4} x_1^3 + \frac{3a_3}{2} x_2^2 x_1) \sin(\phi_1), \\
c_5 &= -\frac{a_2}{2} x_1^2 \cos(\phi_2), \quad c_6 = -\frac{a_3}{4} x_1^3 \sin(\phi_3), \\
c_7 &= (a_1 x_2 + \frac{3a_3}{4} x_2^3 + \frac{3a_3}{2} x_1^2 x_2) \cos(\phi_4), \\
c_8 &= \frac{a_2}{2} x_2^2 \sin(\phi_5), \quad c_9 = -\frac{a_3}{4} x_2^3 \cos(\phi_6), \\
c_{10} &= (a_1 x_2 + \frac{3a_3}{4} x_2^3 + \frac{3a_3}{2} x_1^2 x_2) \sin(\phi_4), \\
c_{11} &= -\frac{a_2}{2} x_2^2 \cos(\phi_5), \quad c_{12} = -\frac{a_3}{4} x_2^3 \sin(\phi_6).
\end{aligned} \tag{4.7}$$

ω_1 ve ω_2 temel frekanslarının ilk üç arakiplenim frekanslarındaki c katsayıları ise Eşitlik (4.8)'deki gibi elde edilmektedir.

$$\begin{aligned} c_{13} &= -a_2 x_1 x_2 \cos(\phi_7), \quad c_{14} = a_2 x_1 x_2 \sin(\phi_7), \\ c_{15} &= a_2 x_1 x_2 \cos(\phi_8), \quad c_{16} = -a_2 x_1 x_2 \sin(\phi_8), \\ c_{17} &= -\frac{3a_3}{4} x_1^2 x_2 \sin(\phi_9), \quad c_{18} = -\frac{3a_3}{4} x_1^2 x_2 \cos(\phi_9). \end{aligned} \quad (4.8)$$

Sonraki üç arakiplenim frekanslarındaki c katsayıları ise Eşitlik (4.9)'da gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} c_{19} &= -\frac{3a_3}{4} x_1^2 x_2 \sin(\phi_{10}), \quad c_{20} = -\frac{3a_3}{4} x_1^2 x_2 \cos(\phi_{10}), \\ c_{21} &= -\frac{3a_3}{4} x_2^2 x_1 \sin(\phi_{11}), \quad c_{22} = -\frac{3a_3}{4} x_2^2 x_1 \cos(\phi_{11}), \\ c_{23} &= -\frac{3a_3}{4} x_2^2 x_1 \sin(\phi_{12}), \quad c_{24} = -\frac{3a_3}{4} x_2^2 x_1 \cos(\phi_{12}). \end{aligned} \quad (4.9)$$

İki-tonlu sinyal iletimi durumunda, Eşitlik (4.6)'da belirtilen doğrusal olmayan hedeflerden geri-ışık sinyal, ω_1 , ω_2 , $2\omega_1$, $2\omega_2$, $3\omega_1$ ve $3\omega_2$ frekansları ile $\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 - \omega_2$, $\omega_2 - 2\omega_1$, $2\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 - 2\omega_2$ ve $2\omega_2 + \omega_1$ arakiplenim frekanslarını içermektedir. Harmonik ve arakiplenim ürünlerinin fazları $[-\pi, \pi]$ aralığında bir değer alan rastgele bir değişken olduğu varsayılmaktadır.

4.3 Doğrusal Model

Bu bölümde, doğrusal olmayan bir hedeften geri-ışık sinyal, doğrusal bir model ile temsil edilmektedir. Doğrusal model, sezim ve kestirim problemlerinde sıklıkla kullanılan ve elektronik devreler hakkında bilgi sağlayan parametreler vektörünü tahmin etmeye yardımcı olan bir modeldir. Doğrusal model, elektronik devreleri karakterize eden deterministik parametre vektörü ve gözlem matrisi ile formüle edilmektedir.

Gözlem matrisi ile bilinmeyen deterministik parametre vektörü, harmonik radar ile türetilmekte ve elektronik devreleri sınıflandırmak için özgün bilgiler sağlamaktadır. Doğrusal olmayan devrelerden geri-ışığıyan sinyal vektörü, \mathbf{r} şu şekilde yazılmaktadır:

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} + \mathbf{w} \quad (4.10)$$

Eşitlik (4.10)'da,

- $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, hedeften geri-ışığıyan sinyali temsil etmektedir ve N geri-ışığıyan sinyalin örnek sayısıdır,
- $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times p}$, sütunları bir frekans bilgisine karşılık gelen ve tam kerteli (full rank) olan tanımlanan gözlem matrisidir,
- $\boldsymbol{\theta} \in \mathbb{C}^{p \times 1}$, \mathbf{H} 'deki sinyal konumunu belirten bilinmeyen deterministik parametre vektörüdür,
- \mathbf{w} , özdeşçe dağılmış bağımsız (iid), sıfır ortalamalı ve $\mathbf{C} = \sigma^2 \mathbf{I}$ kovaryans matrisli normal rastgele vektörler olarak varsayılan CWGN etkisidir.

Burada, p , temel frekanslara ait harmoniklerin ve bu frekansların arakiplenim ürünlerinin toplam sayısını ifade etmektedir. Bu çalışmada sadece birinci, ikinci ve üçüncü dereceden harmonikler incelendiğinden p değeri, tek-tonlu iletim durumu için "6" ve iki-tonlu iletim durumu için "24" olmaktadır. Arakiplenim ürünleri, sadece iki-tonlu iletim durumu oluşmaktadır.

4.3.1 Bilinmeyen parametreler vektörü ve gözlem matrisi

Bu çalışmada, tek-tonlu ve iki-tonlu gücü zamanla değişen bir sinyal, doğrusal olmayan hedeflere gönderilerek her bir elektronik devre için ayırt edici olan $\boldsymbol{\theta}$ vektörü elde edilir. Bilinmeyen parametre vektörü $\boldsymbol{\theta}$, her bir harmonikte elde edilen gücü ifade eder. Bilinmeyen parametre vektörü $\boldsymbol{\theta}$ ve gözlem matrisi \mathbf{H} , hem tek-tonlu hem de iki-tonlu iletim durumları için iki alt bölümde türetilmektedir.

4.3.1.1 Tek-tonlu iletim durumunda geri-ışığıyan sinyal

Tek-tonlu bir sinyal hedeflere gönderildiğinde, hedeften geri-ışığıyan sinyali ifade eden Eşitlik (4.3)'teki ifade, bilinmeyen parametre vektörü $\boldsymbol{\theta}$ ve gözlem matrisi \mathbf{H} ile sunulan doğrusal model yaklaşımına dayalı olarak aşağıdaki eşitlikte yeniden ifade edilmektedir.

$$s_1[n] = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} \quad (4.11)$$

İlk üç harmonik için, $\mathbf{H}^{N \times 6}$ matrisi ve $\boldsymbol{\theta}^{6 \times 1}$ vektörü, Eşitlik (4.3) kullanılarak sırasıyla Eşitlik (4.12) ve Eşitlik (4.13)'teki gibi elde edilir:

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & \dots & b_5 & b_6 \end{bmatrix}^T \quad (4.12)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sin(\omega_0) & \dots & \sin(3\omega_0) & \dots & \cos(3\omega_0) \\ \sin(2\omega_0) & \dots & \sin(6\omega_0) & \dots & \cos(6\omega_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(N\omega_0) & \dots & \sin(3N\omega_0) & \dots & \cos(3N\omega_0) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

4.3.1.2 İki-tonlu iletim durumunda geri-ışığıyan sinyal

İki-tonlu bir sinyal, elektronik devrelere gönderildiğinde, Eşitlik (4.6)'daki hedeften geri-ışığıyan sinyal, bilinmeyen parametre vektörü $\boldsymbol{\theta}$ ve gözlem matrisi \mathbf{H} , çarpılarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$s_2[n] = \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} \quad (4.14)$$

Benzer şekilde, temel frekansların ilk üç harmoniği ve arakiplenim frekansları için $\mathbf{H}^{N \times 24}$ matrisi ve $\boldsymbol{\theta}^{24 \times 1}$ vektörü, Eşitlik (4.6)'dan türetilir.

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_{24} \end{bmatrix}^T \quad (4.15)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \sin(\omega_1) & \dots & \cos(\omega_2) & \dots & \sin(2\omega_2 + \omega_1) \\ \sin(2\omega_1) & \dots & \cos(2\omega_2) & \dots & \sin(4\omega_2 + 2\omega_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sin(N\omega_1) & \dots & \cos(N\omega_2) & \dots & \sin(2N\omega_2 + N\omega_1) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Eşitlik (4.12) ve Eşitlik (4.15)'teki $\boldsymbol{\theta}$ vektörleri, sırasıyla Eşitlik (4.3)'teki ve Eşitlik (4.6)'daki geri-ışık sinyallerin faz bilgisini de içermektedir. Elektronik devrelere tek-tonlu ve iki-tonlu zamanla değişen sinyaller göndererek, her bir devre sınıfına özgü karakteristik $\boldsymbol{\theta}$ vektörleri elde edilebilmektedir. Böylece, bu çalışmada geliştirilen doğrusal model sayesinde, her bir devre türünü diğer türlerden ayıran bir bilinmeyen deterministik parametre vektörü tahmin edilir. Eşitlik (4.10)'da belirtilen CWGN etkisi \mathbf{w} , iletilen güçle orantılı olacak şekilde geri-ışık sinyallere eklenmektedir.

4.4 En Büyük Olabilirlik Kestiricisi

En Büyük Olabilirlik Kestirimi (MLE), yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır çünkü MLE büyük boyutlu verilerde optimal bir performans sunmaktadır. Verilerin gözlenme olasılığını maksimize eden dağılımı veren parametre değerlerini bulmak, MLE'nin temel amacıdır. Eşitlik (4.10)'daki geri-ışık sinyalin Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (PDF), Eşitlik (4.17)'de formüle edilmektedir.

$$p(\mathbf{r}; \boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{\pi^N \sigma^{2N}} \exp \left[-\frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{r} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta})^H (\mathbf{r} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}) \right] \quad (4.17)$$

Eşitlik (4.17)'de ifade edilen PDF'yi maksimize eden değer, $\boldsymbol{\theta}$ 'nın en büyük olabilirlik kestirimidir. Bir başka şekilde ifade edilecek olursa, $\boldsymbol{\theta}$ 'nın en büyük olabilirlik kestirimi, en küçük kareler (LS) hatasını minimum yapmaktadır [62].

$$\lambda = (\mathbf{r} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta})^H (\mathbf{r} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{r}^H \mathbf{r} - \mathbf{r}^H \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{H}^H \mathbf{r} + \boldsymbol{\theta}^H \mathbf{H}^H \mathbf{H}\boldsymbol{\theta} \quad (4.18)$$

λ 'nın gradyanı

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \boldsymbol{\theta}} = -(\mathbf{H}^H \mathbf{r})^* + (\mathbf{H}^H \mathbf{H}\boldsymbol{\theta})^* = - \left[\mathbf{H}^H (\mathbf{r} - \mathbf{H}\boldsymbol{\theta}) \right]^* \quad (4.19)$$

Eşitlik (4.19)'deki ifadenin sıfıra eşitlenmesi ile MLE, aşağıdaki gibi olmaktadır [62].

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{r} \quad (4.20)$$

Eşitlik (4.20)'deki MLE'ye farklı SNR değerlerinde CWGN eklenerek, MATLAB benzetimleri yardımıyla Eşitlik (4.12) ve Eşitlik (4.15)'teki bilinmeyen deterministik parametre vektörleri tahmin edilmektedir.

4.5 Tam Kerteli Gözlem Matrisleri

Eşitlik (4.13)'deki $\mathbf{H}^{N \times 6}$ ve Eşitlik (4.16)'daki $\mathbf{H}^{N \times 24}$ matrislerinin sözde (pseudo) tersi, Eşitlik (4.20)'de belirtildiği gibi en yüksek olabilirlik kestirimi için hesaplanmaktadır. Bu yüzden \mathbf{H} matrislerinin, tam kerteli olması önemlidir.

Geri-ıştıyan sinyal frekanslarının aralığı

$$A\omega_1 \pm B\omega_2 \quad (4.21)$$

Burada A ve B tamsayılarıdır. Tam kerteli \mathbf{H} matrislerinin elde edilebilmesi gerekli koşul

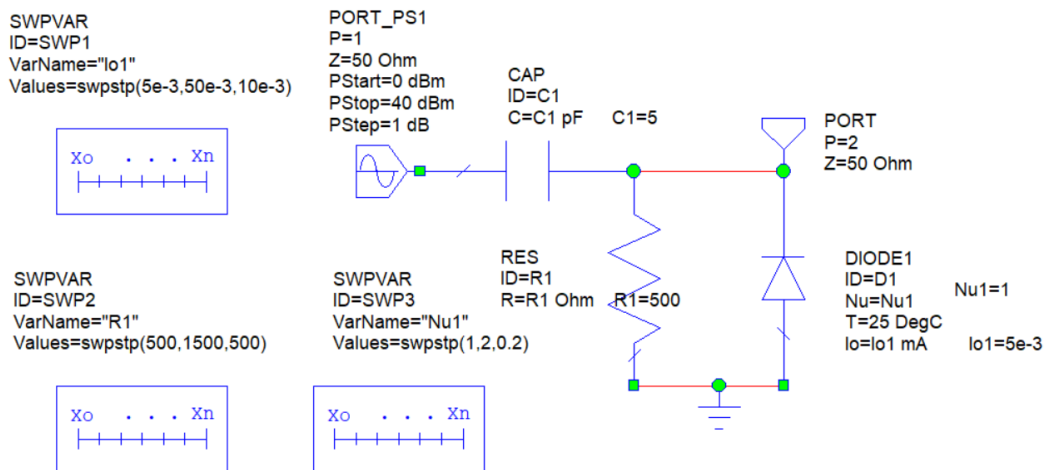
$$A_1\omega_1 + B_1\omega_2 \neq A_2\omega_1 + B_2\omega_2 \quad (4.22)$$

Burada A_1 , A_2 , B_1 ve B_2 tamsayılarıdır. İki-tonlu durum için ω_1 ve ω_2 iletilen frekansları, \mathbf{H} matrisi tam kerteli olacak şekilde seçilmelidir.

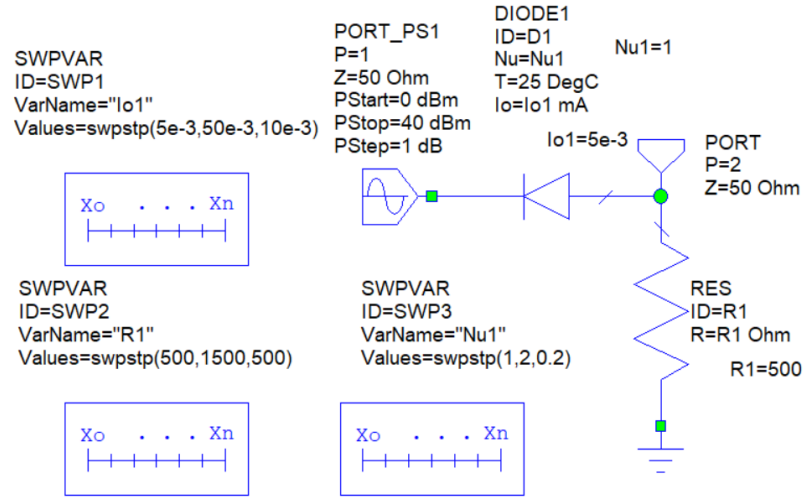
Ayrıca iletilen frekansların tek bir dar bantlı anten tarafından verimli bir şekilde iletilebilmesi için frekanslar birbirine yakın seçilmelidir [46].

4.6 Deneysel Tasarım ve Benzetimler

Bu çalışmada, diyot kenetleyici, diyot sınırlayıcı ve tam dalga doğrultucu devreleri olmak üzere üç farklı devre türü tasarlanarak sunulan yöntemin performansı analiz edilmektedir. Ancak bu çalışmadaki elektronik devreler keyfi olarak seçilmiş doğrusal olmayan devrelerdir. Bu çalışmada geliştirilen doğrusal model herhangi bir tür veya sayıdaki elektronik devreler için de uygulanabilmektedir. Devre şemaları Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de verilen elektronik devrelerde ortak olarak bulunan diyot elementinin doğrusal olmayan I-V eğrisi, bu devrelerin harmonik cevaplar oluşturmaya neden olmaktadır. Diyot kenetleyici devresi [57], bir diyot, kapasitör ve dirençten oluşmakta ve üzerine uygulanan sinyalin dalga formunu değiştirmeden istenen bir DC seviyesine kaydırmaktadır. Diyot sınırlayıcı devreleri [57] ise, bir diyot ve dirençten oluşan devrelerdir. Belirlenen seviyelerin üzerindeki ve altındaki sinyal gerilimlerini kesen veya sınırlayan devrelerdir. Tam dalga doğrultucu devreleri [57], iki diyot, bir transformatör ve bir dirençten oluşmakta ve bu devreler, girişe uygulanan AC sinyalini bir DC sinyaline dönüştürmektedir.

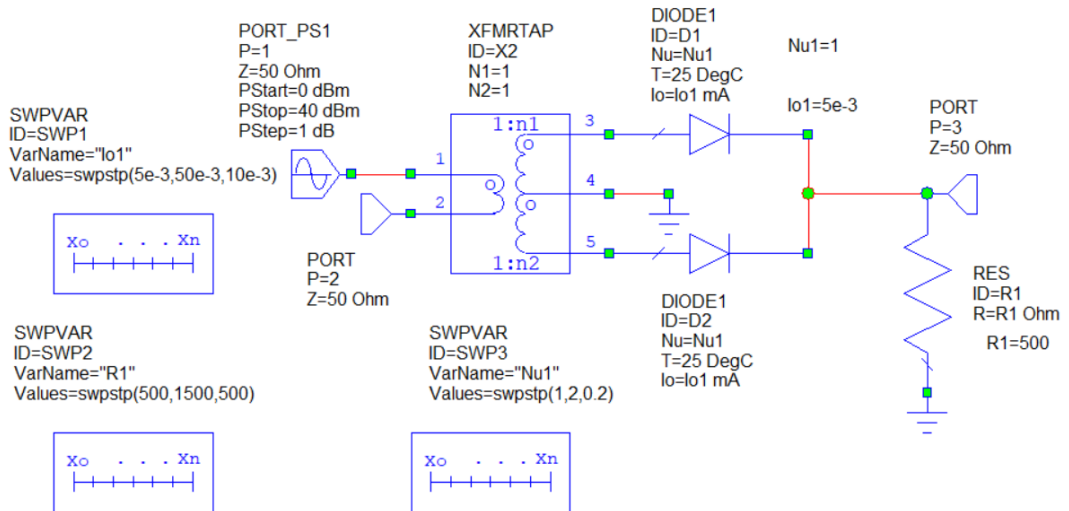


Şekil 4.1: Diyot kenetleyici devre şeması.



Şekil 4.2: Diyot sınırlayıcı devre şeması.

Elektronik devrelerin harmonik yanıtları, Cadence AWR Mikrodalga Ofis programındaki Harmonik Denge (Harmonic Balance) simülatörü kullanılarak toplanmaktadır. Belirlenen devre türlerine ait bir devre seti oluşturmak için direnç, diyotun Nu parametresi ve doyma akımı (I_0) gibi rastgele seçilen elementlerin parametreleri, *SWPVAR* ile süpürülerek bir devre seti elde edilir. Diyota ait Nu parametresi, diyotun ideal diyota ne kadar yaklaştığının bir ifadesidir ve T sıcaklığı temsil etmektedir. *XFMRTAP* ise tam dalga doğrultucu devresindeki transformatördür. Belirlenen bir aralık içerisinde, rastgele seçilen bu parametreler *SWPVAR* ile süpürülerek her bir devre tipi için 90 adet devre olmak üzere toplamda 270 adet devre seti elde edilmektedir.



Şekil 4.3: Tam dalga doğrultucu devre şeması.

Elektronik devrelere, gücü 0 dBm'den 40 dBm'ye 1 dB'lik artışlarla değişen tek-tonlu ve iki-tonlu sinyaller iletilmektedir. Cadence AWR Mikrodalga Ofis programı ile tek-tonlu iletim durumu için birinci, ikinci ve üçüncü harmonikler elde edilmektedir. İki-tonlu iletim durumu için ise iki frekansın ilk üç harmoniğinin yanında bu frekansların arakiplenim ürünlerindeki yanıtlar da toplanmaktadır.

AWR Mikrodalga Ofis programı yardımıyla Eşitlik (4.12) ve Eşitlik (4.15)'teki gerçek θ değerleri elde edilmektedir. Bölüm 4.3'te açıklanan doğrusal model, devrelerin doğrusal olmayan davranışlarını analiz edebilmek için bilinmeyen parametreleri ölçümlerle ilişkilendirmektedir. Farklı tipteki devrelerin, farklı doğrusal olmayan tepkileri vardır.

4.7 Performans Değerlendirmesi ve Benzetim Sonuçları

Performans değerlendirmesine ait sonuçlar tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumları için iki ayrı alt bölümde sunulmaktadır. AWR Mikrodalga Ofis programı ile Bölüm 4.6'daki gibi oluşturulan elektronik devre setlerine güç süpürmeli zamanla değişen tek-tonlu ve iki-tonlu sinyaller iletilerek her bir devrenin harmonik cevapları toplanmaktadır. Sonrasında, Bölüm 4.3'te açıklanan bu çalışmada geliştirilen doğrusal model ile veriler bilinmeyen deterministik parametre vektörleriyle ilişkilendirilmektedir. Elde edilen bu deterministik parametre vektörleri, doğrusal olmayan elektronik devreler için ayırt edilebilir özellikler sağlamaktadır. Önerilen yöntemin etkinliğinin analizi için farklı SNR seviyelerindeki CWGN ile parametre vektörlerinin en büyük olasılık kestirimi yapılır. En büyük olasılık kestirimi sonucunda elde edilen parametre vektörlerinin normalize edilmiş halinin ortalama ve varyans öznitelikleri kullanılarak elektronik devreler sınıflandırılmaktadır. Elektronik devrelerin sınıflandırılmasında kNN algoritması kullanılmaktadır. Tahmini verinin normalize edilmiş hali Z-skoru olarak adlandırılan aşağıda verilen Eşitlik (4.23) ile hesaplanmaktadır.

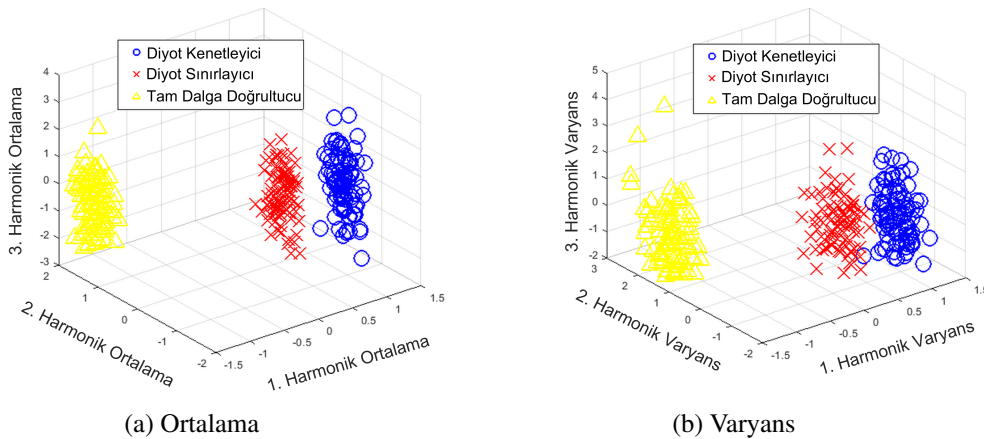
$$\hat{x} = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (4.23)$$

Burada, \hat{x} , x verisinin normalize edilmiş halini, μ ortalama ve σ standart sapmayı ifade etmektedir.

Bu çalışmada, her bir devre türü için: 90 devre \times temel frekansın ilk 3 harmoniği = 270 gerçekleştirme (realization) vardır. Sonuç olarak, tek-tonlu iletim durumunda, 3 farklı devre tipi için: $3 \times 270 = 810$ gerçekleştirme olur. İki-tonlu iletim durumu için ise bir devre türünde: iki temel frekansın ilk 3 harmonikleri ve arakiplenim frekanslarını içeren 12 frekans \times 90 devre = 1080 gerçekleştirme vardır. Dolayısıyla 3 farklı devre tipi için ise: $3 \times 1080 = 3240$ gerçekleştirme olmaktadır. Aşağıda sunulan iki alt bölümde, Monte Carlo benzetimleri kullanılarak önerilen yöntemin performans analizi yapılmaktadır.

4.7.1 Tek-tonlu iletime ait benzetim sonuçları

Bu bölümde, tek-tonlu iletim durumuna ait üç boyutlu harmonik uzayda elde edilen normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin ortalama ve varyans değerleri hesaplanır. Üç boyutlu harmonik uzay, birinci, ikinci ve üçüncü harmonik değerleriyle tanımlanan Şekil 4.4'teki gibidir. Şekil 4.4'te gösterilen grafikler SNR=5 dB için sunulmaktadır. Şekil 4.4(a) ve Şekil 4.4(b)'de görüldüğü gibi normalize edilmiş tahmini vektörlerin ortalaması ve varyansı, ω_0 temel frekansının ilk üç harmoniğinde iyi bir şekilde kümelenmiştir.



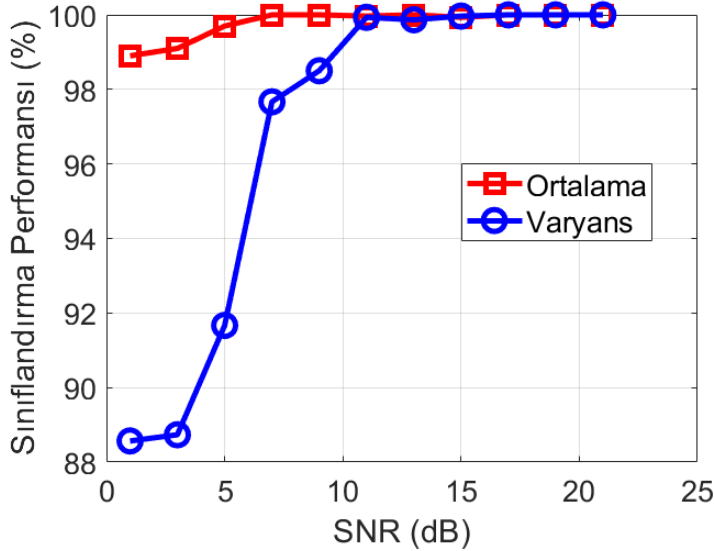
Şekil 4.4: Tek-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB'de normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) Ortalama, (b) Varyans.

Elektronik devrelerin sınıflandırılmasında 3-en yakın komşu algoritması kullanılmıştır. SNR=5 dB için karışıklık matrisleri Çizelge 4.1’de verilmektedir. Normalleştirilmiş tahmini parametrelerin ortalama ve varyans değerleri, SNR=5 dB seviyesinde başarılı bir şekilde sınıflandırılmıştır.

Çizelge 4.1: Tek-tonlu iletim durumu için SNR = 5 dB’deki karışıklık matrisleri.

		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Ortalama	Devre Tipi 1	%99.1	%0.9	%0
	Devre Tipi 2	%0.7	%99.3	%0
	Devre Tipi 3	%0	%0	%100
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Varyans	Devre Tipi 1	%92.5	%7.5	%0
	Devre Tipi 2	%1.3	%98.7	%0
	Devre Tipi 3	%0	%0	%100

Farklı SNR değerleri için gürültülü veri sonuçları ise Şekil 4.5’te verilmiştir. Şekil 4.5’te görüldüğü gibi düşük SNR seviyelerinde ortalama, varyanstan daha iyi bir sınıflandırma performansına sahiptir. Ayrıca hem ortalama hem de varyans, yüksek SNR değerlerinde, %100 sınıflandırma performansına sahiptir.



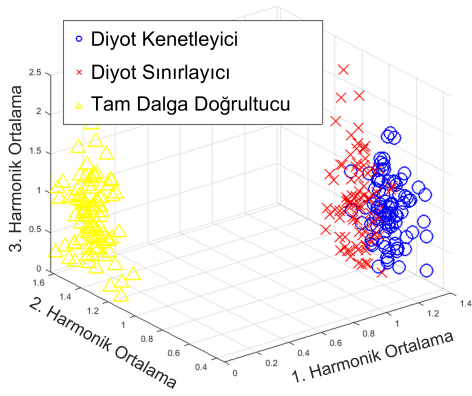
Şekil 4.5: Farklı SNR seviyelerinde, ω_0 iletilen frekansın ilk üç harmoniğinden elde edilen ortalama ve varyans özniteliklerinin sınıflandırma performansları.

4.7.2 İki-tonlu iletme ait benzetim sonuçları

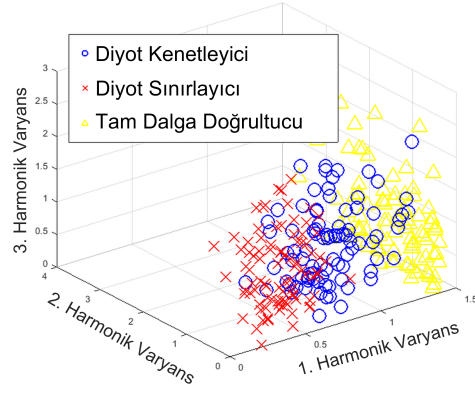
İki-tonlu iletim durumuna ait benzetim sonuçları bu bölümde sunulmaktadır. Normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin ortalama ve varyansına ait sonuçlar verilmektedir. Elektronik devrelere gönderilecek olan iki tonun seçimi önemlidir. Kestiricinin doğru bir şekilde çalışabilmesi için Bölüm 4.5'te açıklandığı şekilde \mathbf{H} matrisinin sütunlarının birbirinden bağımsız olması gerekir. Yani ω_1 ve ω_2 frekansları, \mathbf{H} matrisini tam kerteli yapacak şekilde seçilmelidir.

Şekil 4.6(a) ve Şekil 4.6(b), ω_1 frekansının ilk üç harmoniğindeki, Şekil 4.7(a) ve Şekil 4.7(b) ise ω_2 frekansının ilk üç harmoniğindeki normalize edilmiş tahmini verilerin ortalama ve varyansını göstermektedir. İki tonlu iletim durumunda oluşan $\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 - \omega_2$, $\omega_2 - 2\omega_1$ ilk üç arakiplenim uzayındaki ortalama ve varyanslara ait saçılma diyagramları, sırasıyla Şekil 4.8(a) ve Şekil 4.8(b)'de verilmiştir. Şekil 4.9(a) ve Şekil 4.9(b)'de ise son üç arakiplenim frekanslarındaki ($2\omega_1 + \omega_2$, $\omega_1 - 2\omega_2$, $2\omega_2 + \omega_1$) istatistiksel özniteliklere ait saçılma diyagramları sunulmuştur.

Çizelge 4.2'de, ω_1 ve ω_2 frekanslarının ilk üç harmoniğine ait benzetim sonuçları, karışıklık matrisi şeklinde gösterilmiştir. Çizelge 4.2, SNR=5dB için, ω_1 ve ω_2 frekanslarındaki normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin ortalamasının, varyanstan daha başarılı sınıflandırma performansına sahip olduğunu göstermektedir. İlk üç arakiplenim frekanslarındaki sınıflandırma sonuçları, SNR=5 dB durumu için Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Çizelge 4.3'e göre normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin ortalamasına ait performans, yaklaşık %100 iken, varyans için sınıflandırma başarısı yaklaşık olarak %72 bulunmuştur.

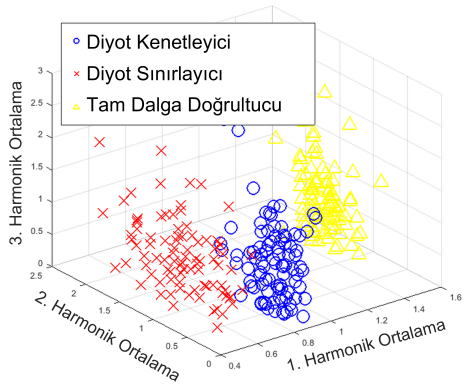


(a) ω_1 frekansının harmonikleri, ortalama

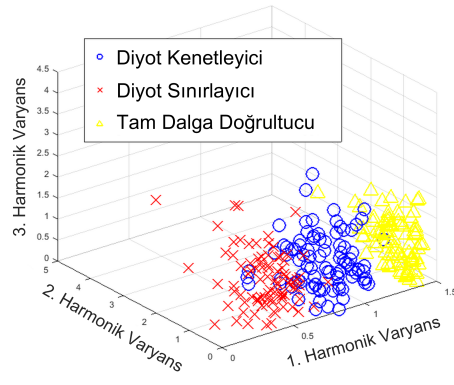


(b) ω_1 frekansının harmonikleri, varyans

Şekil 4.6: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB’de, ω_1 frekansının harmoniklerine ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) ω_1 frekansının harmonikleri, ortalama, (b) ω_1 frekansının harmonikleri, varyans.

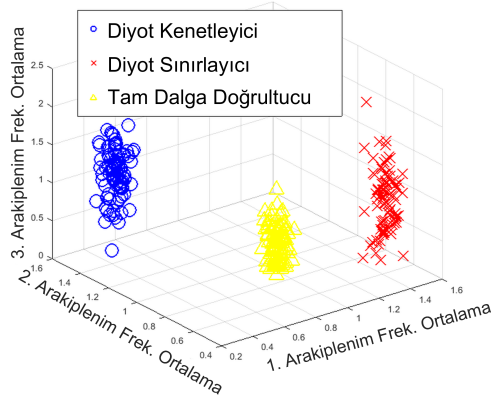


(a) ω_2 frekansının harmonikleri, ortalama

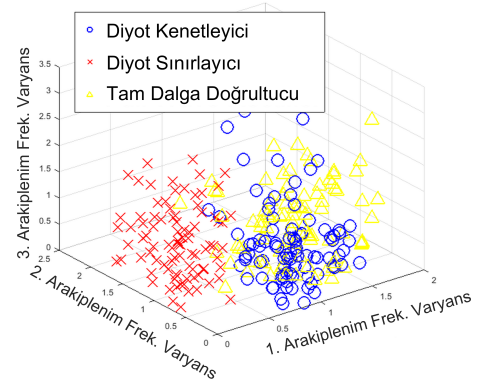


(b) ω_2 frekansının harmonikleri, varyans

Şekil 4.7: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB’de, ω_2 frekansının harmoniklerine ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) ω_2 frekansının harmonikleri, ortalama, (b) ω_2 frekansının harmonikleri, varyans.

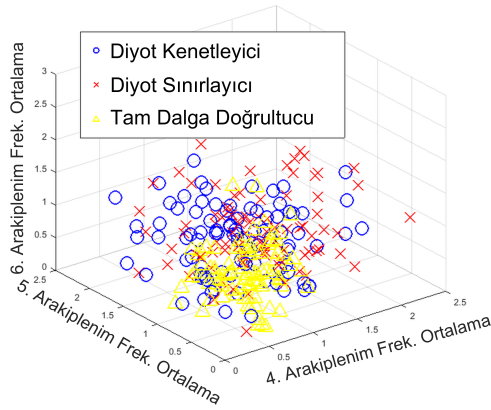


(a) İlk üç arakiplenim frekansları, ortalama

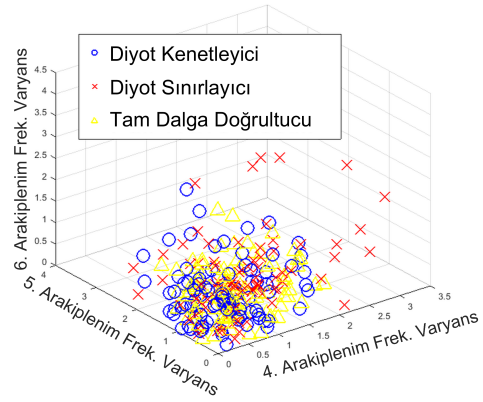


(b) İlk üç arakiplenim frekansları, varyans

Şekil 4.8: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB’de, ilk üç arakiplenim frekanslarına ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) İlk üç arakiplenim frekansları, ortalama, (b) İlk üç arakiplenim frekansları, varyans.



(a) Son üç arakiplenim frekansları, ortalama



(b) Son üç arakiplenim frekansları, varyans

Şekil 4.9: İki-tonlu iletim durumu için SNR=5 dB’de, son üç arakiplenim frekanslarına ait normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin saçılma diyagramları, (a) Son üç arakiplenim frekansları, ortalama, (b) Son üç arakiplenim frekansları, varyans.

Son üç arakiplenim frekansları için karışıklık matrisleri, Çizelge 4.4’te SNR=5 dB için sunulmuştur. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3, Çizelge 4.4 ile kıyaslandığında, SNR=5 dB için, ilk üç arakiplenim frekansları ile ω_1 ve ω_2 frekanslarının ilk üç harmoniğindeki

Çizelge 4.2: SNR = 5dB’de iki-tonlu iletim durumu için ortalama ve varyansa ait karışıklık matrisleri.

ω_1 frekansının ilk üç harmoniği				
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Ortalama	Devre Tipi 1	%96	%4	%0
	Devre Tipi 2	%0	%100	%0
	Devre Tipi 3	%0	%0	%100
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Varyans	Devre Tipi 1	%72.7	%26	%1.3
	Devre Tipi 2	%11.4	%87.7	%0.9
	Devre Tipi 3	%1.5	%0	%98.5

ω_2 frekansının ilk üç harmoniği				
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Ortalama	Devre Tipi 1	%98.6	%1.4	%0
	Devre Tipi 2	%0.1	%99.9	%0
	Devre Tipi 3	%0	%0	%100
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Varyans	Devre Tipi 1	%68.3	%31.2	%0.5
	Devre Tipi 2	%9	%90.9	%0.1
	Devre Tipi 3	%2.7	%0.1	%97.2

Çizelge 4.3: SNR = 5dB’de iki-tonlu iletim durumu için ilk üç arakiplenim frekanslarına ait karışıklık matrisleri.

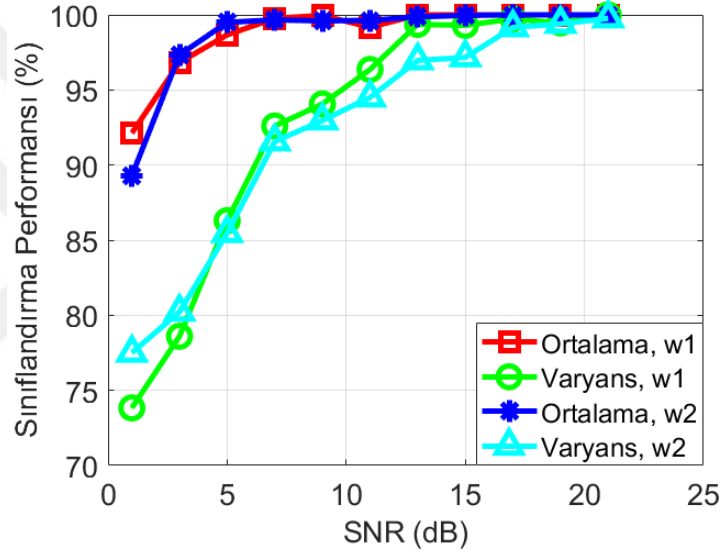
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Ortalama	Devre Tipi 1	%100	%0	%0
	Devre Tipi 2	%0.4	%99.5	%0.1
	Devre Tipi 3	%0	%0	%100
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Varyans	Devre Tipi 1	%75.7	%2.6	%21.7
	Devre Tipi 2	%4.3	%93.1	%2.6
	Devre Tipi 3	%45.2	%7.6	%47.2

Çizelge 4.4: SNR = 5dB’de iki-tonlu iletim durumu için son üç arakiplenim frekanslarına ait karışıklık matrisleri.

		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Ortalama	Devre Tipi 1	%57.8	%20.6	%21.6
	Devre Tipi 2	%35.3	%49.2	%15.5
	Devre Tipi 3	%32.5	%14.5	%53
		Devre Tipi 1	Devre Tipi 2	Devre Tipi 3
Varyans	Devre Tipi 1	%47.2	%21.2	%31.6
	Devre Tipi 2	%39.7	%34.5	%25.8
	Devre Tipi 3	%45	%20.9	%34.1

sonuçların, son üç arakiplenim frekanslarındaki sonuçlardan daha iyi kümelendiği görülmüştür.

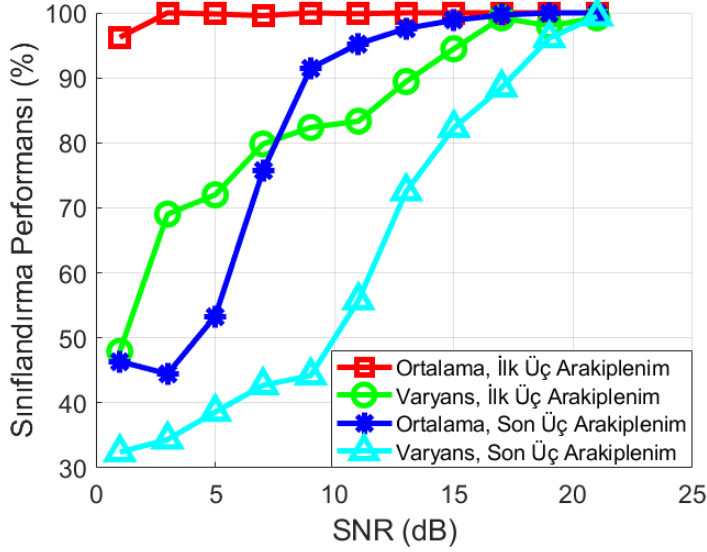
Farklı SNR seviyelerine ait, ω_1 ve ω_2 frekanslarının ilk üç harmoniğindeki normalleştirilmiş tahmini parametre vektörlerinin sınıflandırma performansları, Şekil 4.10'da sunulmuştur. Şekil 4.10, tahmin edilen parametre vektörlerinin ortalamasının sınıflandırma performansının, varyanstan daha iyi olduğunu göstermiştir. Ayrıca, ω_1 ve ω_2 frekanslarının istatistiksel öznitelikleri, kendi aralarında yaklaşık olarak benzer davranışlar sergilemiştir.



Şekil 4.10: Değişen SNR seviyelerinde, ω_1 ve ω_2 frekanslarının ilk üç harmoniğinin istatistiksel özniteliklerine ait sınıflandırma performansları.

Araikiplenim frekanslarındaki normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinin ortalama ve varyansına ait sınıflandırma sonuçları ise Şekil 4.11'de, farklı SNR seviyeleri için verilmiştir. İlk üç arakiplenim frekanslarındaki ortalama verinin performansı yaklaşık olarak %100 çıkmıştır. Şekil 4.11'den elde edilen bir başka önemli sonuç ise düşük SNR seviyelerinde, ilk üç arakiplenim frekanslarındaki ortalama ve varyans verileri, son üç arakiplenim frekanslarındaki sonuçlara göre daha başarılı performans sunmuştur.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki elektronik devrelerin sınıflandırmasına



Şekil 4.11: Değişen SNR seviyelerinde, arakiplenim frekanslarının istatistiksel özniteliklerine ait sınıflandırma performansları.

ait iki adet çalışma ile karşılaştırıldığında, ilk olarak, birkaç farklı alıcı antenin kullanıldığı çalışmaya [12] ait sonuçlar ele alınmıştır. [12] çalışmasına ait farklı gerçekleştirmelerin minimum, maksimum, ortalama ve standart sapmaya ait sınıflandırma performansı, farklı cihaz türleri için Çizelge 2.3'te verilmiştir. Bu alanda yapılan, harmonik verilerin istatistiksel özniteliklerinin analiz edildiği, ikinci bir çalışmaya [43] ait sınıflandırma performansı sonuçları ise Şekil 2.13a'da sunulmuştur. Şekil 2.13a'da, SNR=5dB seviyesindeki, ortalamaya ait performans yaklaşık %97 iken varyans için %67 çıkmıştır.

Elektronik devrelerin sınıflandırılmasına ait yukarıda bahsedilen çalışmalarda, harmonik verilerin toplanma şekli ve kullanılan öznitelikler farklılık göstermektedir. Dolayısıyla bu çalışmalardaki performans sonuçlarının doğrudan kıyaslanması, çok sağlıklı olmasa da bu çalışmalarda kullanılan yöntemler, belirlenen öznitelikler ve sınıflandırma sonuçları, konunun anlaşılması için önem arz etmektedir.

4.8 Sonuçlar

Bu çalışmada, diyot kenetleyici, diyot sınırlayıcı ve tam dalga doğrultucu gibi çeşitli doğrusal olmayan elektronik devreler, sunulan doğrusal modele ve bilinmeyen

parametre vektörlerinin tahminine dayalı yeni bir yöntem ile sınıflandırılmıştır. Elektronik devrelere güç süpürmeli zamanla değişen sinyaller iletilmiştir. Devrelere ait harmonik cevaplar, Cadence AWR Mikrodalga Ofis programı ile elde edilmiştir. Bu çalışmada önerilen doğrusal model sayesinde ölçülen veriler, bir gözlem matrisi ve deterministik parametre vektörü cinsinden ifade edilmiştir. Önerilen doğrusal model, literatürdeki harmonik radar çalışmalarının aksine, problemi analitik olarak çözümlenmeyi sağlamaktadır. Bu çalışmadaki sunulan yöntem sayesinde, geniş ve çeşitli problemlerde daha etkili ve hızlı bir şekilde sonuca ulaştırmayı sağlamaktadır.

Elektronik devrelerin ayırt edici olmasını sağlayan parametre vektörleri, en büyük olabilirlik kestirimi kullanılarak tahmin edilmiştir. Devrelerin sınıflandırılmasında, normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinden, ortalama ve varyans istatistiksel öznitelikleri elde edilmiş ve bu öznitelikler kullanılarak elektronik devreler sınıflandırılmıştır. Devrelerin harmonik yanıtları, hem tek-tonlu hem de iki-tonlu iletim durumları için analiz edilmiştir. Önerilen yöntemin performansının etkinliği için gürültü eklenmiş veriler kullanılarak Monte Carlo benzetimleri ile devreler sınıflandırılmıştır. kNN algoritması kullanılarak elektronik devreler sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma sonuçları, tek bir SNR seviyesine ait karışıklık matrisleri ve saçılma diyagramlarının yanında, farklı SNR değerlerinde elde edilen sınıflandırma performansları şeklinde sunulmuştur. Benzetim sonuçları incelendiğinde, güç süpürmeli sinyalin hedeflere iletilmesi ve bilinmeyen deterministik parametre vektörlerinin tahminine dayalı olan önerilen bu yöntemin, harmonik radar ile elektronik devrelerin sınıflandırılmasında etkili olduğu görülmüştür.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda, temel frekansların dördüncü, beşinci, vb. daha yüksek harmonikleri için sınıflandırıcının ve kestiricinin performansı analiz edilebilir. Ayrıca bir deney düzeneği ile doğrusal olmayan test devrelerinden elde edilen gerçek harmonik veriler kullanılarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrulanabilir.



5. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

İletilen dalga, diyot, transistör, yükselteç, vb. doğrusal olmayan devre elemanlarından oluşan elektronik devrelere çarptığında harmonik frekanslarda geri-ışınım meydana gelir. Doğrusal radarlarda, hedefe gönderilen sinyalin aynı frekansında sinyaller analiz edilirken, harmonik radarlarda temel frekansın yanı sıra harmoniklere de ulaşmak mümkün olmaktadır. Bu durum harmonik radar için önemli uygulama alanları sunmaktadır. Literatürdeki çalışmalar çoğunlukla elektronik hedeflerin tespiti, takibi ve menzillerinin belirlenmesine yönelik olmuştur. Ancak elektronik devrelerin ayrıştırılması ve sınıflandırılmasına yönelik sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tezde, doğrusal olmayan yapıdaki devre elemanlarını içeren birbirinden farklı elektronik devrelerin tespiti ve sınıflandırılması tamamen özgün ve yeni metotlar ile yapılmıştır.

İlk olarak, Bölüm 2’de sunulan FSHR yaklaşımı sayesinde çeşitli elektronik devreler harmonik radar ile sınıflandırılmıştır. Elektronik devrelere frekans süpürmeli sabit güçte bir sinyal iletilerek, devrelerin harmonik yanıtları analiz edilmiştir. Her bir devreye ait çıkış gücü eğrilerinden elde edilen istatistiksel ve Fourier öznitelikleri kullanılarak devreler sınıflandırılmıştır. Birinci, ikinci ve üçüncü harmoniklerdeki çıkış gücü eğrilerinden varyans, çarpıklık ve basıklık gibi istatistiksel öznitelikler elde edilmiştir. Bu istatistiksel öznitelikler, farklı tipteki elektronik devreler için farklı davranışlar sergilemiştir. Ayrıca alınan güçlerin farklı frekans seviyelerdeki Fourier dönüşümlerinin enerji değerleri, elektronik devreleri karakterize etmede kullanılmıştır. FSHR yaklaşımına ait sınıflandırma performansı hem harmonik hem de öznitelik uzaylarında incelenmiştir. Ayrıca elektronik devrelere ait harmonik yanıtlar, CWGN ile gömülmüş ve sınıflandırma performansı Monte Carlo simülasyonları ile değerlendirilmiştir. Devrelerin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan kNN sınıflandırıcısı tercih edilmiştir. Sınıflandırma sonuçları, hem karışıklık matrisleri hem de farklı SNR değerlerinde performans grafikleri halinde sunulmuştur. Önerilen FSHR

yaklaşımı, harmonik radar ile elektronik devrelerin sınıflandırılmasında başarılı sonuçlar vermiştir. Ek olarak, sunulan yöntem, literatürdeki harmonik radar ile elektronik devrelerin sınıflandırılmasına ait diğer çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Bölüm 3'te, yeni öznitelik kümeleri kullanılarak elektronik devreler sınıflandırılmıştır. Frekans süpürmeli sabit güce sahip sinyaller, elektronik devrelere gönderilmiş ve devrelerin çıkış gücü eğrilerinden istatistiksel ve Fourier öznitelik kümeleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, Bölüm 2'deki çalışmanın devamı olarak performans karşılaştırmalarında daha kapsamlı bir anlayışa sahip olabilmek için oluşturulan öznitelik kümelerinde, hem harmonikler hem de öznitelik parametreleri olacak şekilde daha fazla parametreden faydalanılmıştır. Bölüm 2'de elde edilen sonuçlara göre öznitelik kümeleri, sınıflandırma performansında önemli bir artış sağlamıştır.

Bölüm 4'te geliştirilen doğrusal model ile elektronik devrelerin harmonik cevapları, parametre vektörleri ile ilişkilendirilmiştir. Elektronik devrelere tek-tonlu ve iki-tonlu gücü zamanla değişen sinyaller iletilmiş ve ilk üç harmonikte ve arakiplenim frekanslarında elde edilen tepkiler ele alınmıştır. Elektronik devrelerden elde edilen ölçümler, doğrusal model ve bilinmeyen deterministik parametre vektörleri ile ilişkilendirilmiştir. Bilinmeyen deterministik parametre vektörleri ve gözlem matrisleri, tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumları için ayrı ayrı elde edilmiştir. Sonrasında parametre vektörleri, Monte Carlo benzetimleri ile farklı SNR değerlerine sahip CWGN etkisinde MLE ile tahmin edilmiştir. Tahmin edilen parametre vektörleri, her bir elektronik devre için ayırt edicidir. Normalize edilmiş tahmini parametre vektörlerinden elde edilen ortalama ve varyans öznitelikleri kullanılarak elektronik devrelerin sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Sınıflandırma işleminde kNN algoritması tercih edilmiştir. Tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumuna ait benzetim sonuçları, saçılma diyagramları ve karışıklık matrisleri halinde bir SNR değeri için verilmiştir. Ayrıca, değişen SNR değerleri için de sınıflandırma performansları incelenmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre doğrusal modele dayalı bilinmeyen deterministik parametre vektörleri, tek-tonlu ve iki-tonlu iletim durumları için elektronik devrelerin sınıflandırılmasında etkili olmuştur.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasında, frekans ve güç değişiminin yanında farklı tipteki dalga şekillerinin hedeflere iletilmesiyle, hedeflerden geri-ışığıyan sinyalleri temsil edecek öznitelikler kullanılarak elektronik devrelerin sınıflandırılması vardır. Ayrıca bir başka çalışma ile, deneysel bir düzenek kullanılarak bu çalışmada elde edilen sonuçlar test edilip doğrulanabilir. Gelecekte yapılması planlanan başka bir çalışmada ise hedeflere iletilen temel frekansın daha yüksek harmonikleri için en büyük olabilirlik kestiricisinin ve kNN sınıflandırıcısının performansı analiz edilebilir.





KAYNAKLAR

- [1] **Anthony Martone, Kenneth Ranney, Gregory Mazzaro, David McNamara, Jerry Silvius, Kelly Sherbondy, Kyle Gallagher, and Ram Narayanan.** Spectrum sensing techniques for nonlinear radar. In *Radar Sensor Technology XVIII*, volume 9077, page 90770D. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [2] **E. J. Powers, J. Y. Hong, and Y. C. Kim.** Cross sections and radar equation for nonlinear scatterers. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-17(4):602–605, 1981.
- [3] **Lu Rong and Wang Hai-yong.** The re-radiation characteristics of nonlinear target in harmonic radar detection. In *Microwave Conference, 2008 China-Japan Joint*, pages 661–664. IEEE, 2008.
- [4] **James William Nilsson and Susan A Riedel.** *Electric circuits*. Pearson, 2020.
- [5] **Donald A. Neamen.** *Microelectronics: circuit analysis and design*, volume 43. McGraw-Hill New York, 2007.
- [6] **Huseyin Aniktar, Dursun Baran, Enes Karav, Eren Akkaya, Y. Serdar Birecik, and Mehmet Sezgin.** Getting the bugs out: A portable harmonic radar system for electronic countersurveillance applications. *IEEE Microwave Magazine*, 16(10):40–52, 2015.
- [7] **Stephen A Maas.** *Nonlinear microwave and RF circuits*. Artech House, 2003.
- [8] **Handan Ilbegi, Harun Taha Hayvaci, Imam Samil Yetik, and Asim Egemen Yilmaz.** Distinguishing electronic devices using harmonic radar. In *Radar Conference (RadarConf), 2017 IEEE*, pages 1527–1530. IEEE, 2017.

- [9] **Handan Ilbegi, Harun Taha Hayvaci, and Imam Samil Yetik.** Distinguishing electronic devices using fourier features derived from harmonic radar. In *2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pages 1502–1505. IEEE, 2017.
- [10] **He Huan and Fu Wen-bin.** On passive intermodulation at microwave frequencies. In *Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics, 2003. CEEM 2003. Proceedings.* pages 422–425. IEEE, 2003.
- [11] **Carlos Vicente and Hans L. Hartnagel.** Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53(8):2515–2525, 2005.
- [12] **Kyle Gallagher.** *Harmonic Radar: Theory and Applications to Nonlinear Target Detection, Tracking, Imaging and Classification.* PhD thesis, Pennsylvania State University, 2015.
- [13] **Gregory J. Mazzaro and Kelly D. Sherbondy.** Combined linear and nonlinear radar: Waveform generation and capture. Technical report, Army Research Lab Adelphi MD Sensors and Electron Devices Directorate, 2013.
- [14] **Gregory J. Mazzaro, Kyle A. Gallagher, Kelly D. Sherbondy, and Anthony F Martone.** Nonlinear radar: a historical overview and a summary of recent advancements. In *Radar Sensor Technology XXIV*, volume 11408, page 114080E. International Society for Optics and Photonics, 2020.
- [15] **Gregory J. Mazzaro, Anthony F. Martone, and David M. McNamara.** Detection of RF electronics by multitone harmonic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 50(1):477–490, 2014.

- [16] **John A. Kosinski, W. Devereux Palmer, and Michael B. Steer.** Unified understanding of RF remote probing. *IEEE Sensors Journal*, 11(12):3055–3063, 2011.
- [17] **Jone Saebboe, Ville Viikari, Timo Varpula, Heikki Seppä, Shi Cheng, Mustafa Al-Nuaimi, Paul Hallbjörner, and Anders Rydberg.** Harmonic automotive radar for VRU classification. In *2009 International Radar Conference-Surveillance for a Safer World, RADAR 2009*, pages 1–5. IEEE, 2009.
- [18] **Bruce Colpitts, David Luke, Gilles Boiteau, and Michael Doyle.** Harmonic radar identification tag for insect tracking. In *Engineering Solutions for the Next Millennium. 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, volume 2, pages 602–605. IEEE, 1999.
- [19] **Matthew E. O’Neal, D.A. Landis, E. Rothwell, L. Kempel, and D. Reinhard.** Tracking insects with harmonic radar: a case study. *American Entomologist*, 50(4):212–218, 2004.
- [20] **Bruce G. Colpitts and Gilles Boiteau.** Harmonic radar transceiver design: Miniature tags for insect tracking. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 52(11):2825–2832, 2004.
- [21] **Dimitris Psychoudakis, William Moulder, Chi-Chih Chen, Heping Zhu, and John L Volakis.** A portable low-power harmonic radar system and conformal tag for insect tracking. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 7:444–447, 2008.
- [22] **Nazifa Tahir and Graham Brooker.** Recent developments and recommendations for improving harmonic radar tracking systems. In *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, pages 1531–1535. IEEE, 2011.

- [23] **Nazifa Tahir and Graham Brooker.** Toward the development of millimeter wave harmonic sensors for tracking small insects. *IEEE Sensors Journal*, 15(10):5669–5676, 2015.
- [24] **Stefano Bottigliero, Daniele Milanesio, Maurice Saccani, Riccardo Maggiora, Alessandro Viscardi, and Marco Matteo Gallesi.** An innovative harmonic radar prototype for miniaturized lightweight passive tags tracking. In *2019 IEEE Radar Conference (RadarConf)*, pages 1–6. IEEE, 2019.
- [25] **Daniele Milanesio, Stefano Bottigliero, Maurice Saccani, Riccardo Maggiora, Alessandro Viscardi, and Marco Matteo Gallesi.** An harmonic radar prototype for insect tracking in harsh environments. In *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, pages 648–653. IEEE, 2020.
- [26] **Greg Storz and Anastasia Lavrenko.** Compact low-cost FMCW harmonic radar for short range insect tracking. In *2020 IEEE International Radar Conference (RADAR)*, pages 642–647. IEEE, 2020.
- [27] **Anastasia Lavrenko, Benjamen Litchfield, Graeme Woodward, and Stephen Pawson.** Design and evaluation of a compact harmonic transponder for insect tracking. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 30(4):445–448, 2020.
- [28] **Zuo-Min Tsai, Pei-Hung Jau, Nai-Chung Kuo, Jui-Chi Kao, Kun-You Lin, Fan-Ren Chang, En-Cheng Yang, and Huei Wang.** A high range resolution 9.4/18.8 GHz harmonic radar for bees searching. In *2012 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pages 1–3. IEEE, 2012.

- [29] **Zuo-Min Tsai, Pei-Hung Jau, Nai-Chung Kuo, Jui-Chi Kao, Kun-You Lin, Fan-Ren Chang, En-Cheng Yang, and Huei Wang.** A high-range-accuracy and high-sensitivity harmonic radar using pulse pseudorandom code for bee searching. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(1):666–675, 2012.
- [30] **Yu-Ting Liu, Miao-Lin Hsu, Huei Wang, and Zuo-Min Tsai.** A differential miniature transponder for 9.4/18.8 GHz harmonic bee searching radar with low gain degradation from bee’s body. In *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, pages 1–4. IEEE, 2016.
- [31] **Abanob Abdelnour, Antonio Lazaro, Ramón Villarino, Darine Kaddour, Smail Tedjini, and David Girbau.** Passive harmonic RFID system for buried assets localization. *Sensors*, 18(11):3635, 2018.
- [32] **Saikat Mondal, Deepak Kumar, and Premjeet Chahal.** Recent advances and applications of passive harmonic RFID systems: A review. *Micromachines*, 12(4):420, 2021.
- [33] **Daniel G. Jablonski, Harvey W. Ko, Douglas A. Oursler, Dexter G. Smith, and David M White.** System and method of radar detection of non-linear interfaces, 2004. US Patent 6,765,527.
- [34] **Daniel W. Steele, Frank S. Rotondo, and Jeffrey L. Houck.** Radar system for manmade device detection and discrimination from clutter, November 9, 2010. US Patent 7,830,299.
- [35] **Walter J. Keller.** Active improvised explosive device (IED) electronic signature detection, 2011. US Patent 8,063,813.
- [36] **Eugene M. Schultz, Randy D. Curry, and Richard A. Niksch.** Explosive device countermeasures, July 26, 2011. US Patent 7,987,068.

- [37] **Gary E. Lehtola.** RF receiver sensing by harmonic generation, 2011. US Patent 7,864,107.
- [38] **Aaron Lael Walker and Peter Marcus Buff III.** Method and apparatus for remote detection of radio-frequency devices, March 6 2012. US Patent 8,131,239.
- [39] **Sandor Holly and Donald Elliot Harrington.** Multi-band receiver using harmonic synchronous detection, 2014. US Patent 8,903,669.
- [40] **Gregory J. Mazzaro, Anthony F. Martone, Kenneth I. Ranney, and Ram M. Narayanan.** Nonlinear radar for finding RF electronics: System design and recent advancements. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65(5):1716–1726, 2017.
- [41] **Gregory J. Mazzaro and Kelly D. Sherbondy.** Harmonic nonlinear radar: From benchtop experimentation to short-range wireless data collection. In *Radar Sensor Technology XXIII*, volume 11003, page 110030F. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [42] **Maryam Shahi, Handan Ilbegi, Imam Samil Yetik, and Harun Taha Hayvaci.** Distinguishing electronic devices using harmonic radar based on a linear model. In *2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pages 1260-1263. IEEE, 2019.
- [43] **Harun Taha Hayvaci, Handan Ilbegi, and Imam Samil Yetik.** Classification of electronic devices with power-swept signals using harmonic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 56(3):2292–2301, 2019.

- [44] **Harun Taha Hayvaci, Maryam Shahi, Handan Ilbegi, and Imam Samil Yetik.** A linear model for classification of electronic devices using harmonic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(6):3614–3622, 2021.
- [45] **Antony F. Martone and Edward J. Delp.** Characterization of RF devices using two-tone probe signals. In *2007 IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing*, pages 161-165. IEEE, 2007.
- [46] **Gregory J. Mazzaro, Kenneth I. Ranney, Kyle A. Gallagher, and Anthony F. Martone.** Multitone radar with range determination and method of use, 2019. US Patent 10,203,405.
- [47] **Gregory J. Mazzaro, Kenneth I. Ranney, Kyle A. Gallagher, Sean F. McGowan, and Anthony F. Martone.** Simultaneous-frequency nonlinear radar: Hardware simulation. Technical report, Army Research Lab Sensors and Electron Devices Directorate Adelphi MD, 2015.
- [48] **Tor Berger and Svein-Erik Hamran.** Harmonic synthetic aperture radar processing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(10):2066-2069, 2015.
- [49] **Gregory J. Mazzaro, Kyle A. Gallagher, Anthony F Martone, and Ram M. Narayanan.** Stepped-frequency nonlinear radar simulation. In *Radar Sensor Technology XVIII*, volume 9077, page 90770U. International Society for Optics and Photonics, 2014.

- [50] **Kenneth Ranney, Kyle A. Gallagher, Anthony F. Martone, Gregory J. Mazzaro, and Ram Narayanan.** Instantaneous, stepped-frequency, nonlinear radar. In *Radar Sensor Technology XIX; and Active and Passive Signatures VI*, volume 9461, page 647-654. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [51] **Sean F. McGowan, Gregory J. Mazzaro, Kelly D. Sherbondy, and Ram M. Narayanan.** Harmonic phase response of nonlinear radar targets. Technical report, Army Research Lab Sensors and Electron Devices Directorate Adelphi MD, 2015.
- [52] **Gregory J. Mazzaro.** Detection of radio-frequency electronics by stimulated emission of carrier modulation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021.
- [53] **Vladimir Polacek and Radomir Pavlik.** The use of digital modulation signals in radar system for detection of nonlinear scatterers. In *2011 12th International Radar Symposium (IRS)*, pages 743–747. IEEE, 2011.
- [54] **T.G. Leighton, Gim Hwa Chua, P.R. White, K.F. Tong, H.D. Griffiths, and D.J. Daniels.** Radar clutter suppression and target discrimination using twin inverted pulses. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 469(2160):20130512, 2013.
- [55] **Gregory J. Mazzaro, Andrew J. Sherbondy, Matthew R. Judy, and Kyle A. Gallagher.** Detection of metallic and electronic radar targets by acoustic modulation of electromagnetic waves. Technical report, US Army Research Laboratory 2800 Powder Mill Road United States, 2017.
- [56] **D. N. Joanes and C. A. Gill.** Comparing measures of sample skewness and kurtosis. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, 47(1):183–189, 1998.

- [57] **Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky.** *Electronic devices and circuit theory*. Prentice Hall, 2012.
- [58] **Mike Tooley.** *Electronic Circuits–Fundamentals & Applications*. Routledge, 2007.
- [59] **Bryan W. Allen.** *Analogue Electronics for Higher Studies*. Macmillan International Higher Education, 1995.
- [60] **Thomas L. Floyd.** *Electronics Fundamentals: Circuits, Devices and Applications (Floyd Electronics Fundamentals Series)*. Prentice-Hall, Inc., 2006.
- [61] **Richard O. Duda, Peter E. Hart, and David G. Stork.** *Pattern classification*. John Wiley & Sons, 2012.
- [62] **Steven M Kay.** *Fundamentals of statistical signal processing*. Prentice Hall PTR, 1993.

